



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**STUDIUM VLASTNOSTÍ LASEROVÝCH SVARŮ  
MATERIÁLU DOMEX 700 MC PŘI VYUŽITÍ  
OBLOUKOVÉHO PŘEDEHŘEVU**

STUDY OF PROPERTIES OF LASER WELDS OF DOMEX 700 MC MATERIAL USING ARC PREHEATING

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Jakub Kosinka**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**

**BRNO 2018**

# Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Student: **Bc. Jakub Kosinka**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Strojírenská technologie  
Vedoucí práce: **doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

## **Studium vlastností laserových svarů materiálu Domex 700 MC při využití obloukového přehřevu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Provést analýzu vlivu obloukového přehřevu při laserovém svařování pevnostní jemnozrnné oceli Domex 700 MC. Vzniklé tupé svary testovat z hlediska mechanických vlastností, svarových vad. Provést technicko–ekonomické zhodnocení této technologie.

### **Cíle diplomové práce:**

Osvojit si technologii laserového svařování.  
Osvojit si problematiku svařování ocelí s vyšším uhlíkovým ekvivalentem, včetně možných technik přehřevu.  
Osvojit si metodiku návrhu a provedení experimentu.  
Osvojit si základy metalografického vyhodnocování svaru.  
Osvojit si metody mechanických zkoušek svarového spoje.

### **Seznam doporučené literatury:**

BENKO B., FODEREK P., KOSEČEK M., BIELAK R.I: Laserové technológie, 1.vyd., Bratislava, Vydavateľstvo STU, 2000, edice 4859, ISBN 80-227-1425-9.

DULEY W.W.: Laser welding, New York 1999, A.Wiley-Interscience publication, ISBN 0-471-24679-4.

KANNATEY-ASIBU, E.: Principles of Materials Processing, John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009, ISBN 978-0-470-17798-3.

AMBROŽ O., KANDUS B., KUBÍČEK J.: Technologie svařování a zařízení, Ostrava, Zeross, 2001, 395 str. ISBN 80-85771-81-0.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

KOSINKA Jakub: Studium vlastností laserových svarů materiálu Domex 700 MC při využití obloukového předehřevu.

---

Tato práce se zabývá zkoumáním vlivu předehřevu/dohřevu obloukovou metodou TIG v procesu laserového svařování jemnozrnné pevnostní oceli Domex 700 MC skrze posuzování vlastností svarů zhotovených právě pomocí laseru, resp. hybridní technologie laser – TIG. Stěžejní součástí této práce je experiment, při němž byly svařovány plechy tloušťky 3 mm zmíněné oceli Domex 700 MC, a to nejprve samotným laserem, poté laserem s obloukovým předehřevem a v posledku laserem s obloukovým dohřevem. Proměnným parametrem během používání předehřevu či dohřevu pak byla vzdálenost wolframové elektrody TIG od laserového paprsku ( $D_{LA} = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$  a  $4 \text{ mm}$ ). Kritériem pro posuzování takto zhotovených svarů byla pevnost v tahu ověřená tahovou zkouškou. Za účelem detailnějšího studia vlastností laserových svarů byla provedena analýza makrostruktury/mikrostruktury svaru a zkouška tvrdosti dle Vickerse.

Klíčová slova: laserové svařování, předehřev, laser-TIG, Domex 700 MC

## ABSTRACT

KOSINKA Jakub: The study of laser-welds properties of material Domex 700 MC using arc preheating

---

This thesis deals with the study of influence of preheating/reheating by TIG arc method in the laser welding process of Domex 700 MC fine-grained steel through the evaluation of laser-welds properties, respectively properties of welds made by laser-TIG hybrid technology. The main part of this thesis is experiment, in which Domex 700 MC plates 3 mm thick were welded – first using laser itself, then using laser with arc preheating and finally using laser with arc reheating. The variable parameter during the processes preheating or reheating was distance of TIG tungsten electrode and laser beam ( $D_{LA} = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm}$  and  $4 \text{ mm}$ ). The criterion for the assessment of welds properties thus produced was tensile strength verified by the tensile test. For a more detailed study of the laser-welds properties, a macrostructure / weld microstructure analysis and a Vickers hardness test were performed.

Keywords: laser welding, preheating process, laser-TIG, Domex 700 MC

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

KOSINKA, Jakub. *Studium vlastností laserový svařů materiálu Domex 700 MC při využití obloukového předehřevu*. Brno, 2018. 73s, 2 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 25. 05. 2018

.....

Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji panu doc. RNDr. Liboru Mrňovi, Ph.D. za věcné připomínky a cenné rady týkající se zpracování této diplomové práce. Dále děkuji paní Ing. Mgr. Haně Šebestové Ph.D., panu Ing. Petru Horníkovi, panu Ing. Kamilu Podanému, Ph.D. a panu Vojtěchu Řiháčkovi za obětavou a vstřícnou pomoc při realizaci experimentu, jenž je součástí této práce. V neposlední řadě děkuji svým rodičům a přátelům za podporu během studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
-------------------	-----------

<b>1 ROZBOR ZADÁNÍ .....</b>	<b>11</b>
------------------------------	-----------

1.1 Vymezení řešeného problému .....	11
--------------------------------------	----

1.2 Návrh řešení.....	13
-----------------------	----

<b>2 ROZBOR SVAŘOVÁNÍ LASEREM .....</b>	<b>16</b>
---	-----------

2.1 Vznik laserového záření .....	16
-----------------------------------	----

2.2 Princip laserového zařízení.....	18
--------------------------------------	----

2.3 Rozdělení a typy průmyslových laserů.....	19
---	----

2.3.1 Plynové CO <sub>2</sub> – lasery .....	20
--	----

2.3.2 Pevnolátkové lasery .....	21
---------------------------------	----

2.3.3 Polovodičové (diodové) lasery .....	24
---	----

2.4 Princip laserového svařování.....	25
---------------------------------------	----

2.5 Parametry laserového svařování .....	27
--	----

2.6 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí .....	28
--	----

2.6.1 Metalurgické pochody při svařování .....	28
--	----

2.6.2 Materiálová svařitelnost nízkolegovaných ocelí.....	30
---	----

2.6.3 Technologická svařitelnost v rámci svařování laserem .....	35
--	----

2.7 Použití technologie TIG v rámci laserového svařování.....	37
---	----

2.7.1 Princip technologie TIG.....	37
------------------------------------	----

2.7.2 Hybridní svařování LASER-TIG.....	40
---	----

2.8 Vady svarů zhotovených laserem .....	41
--	----

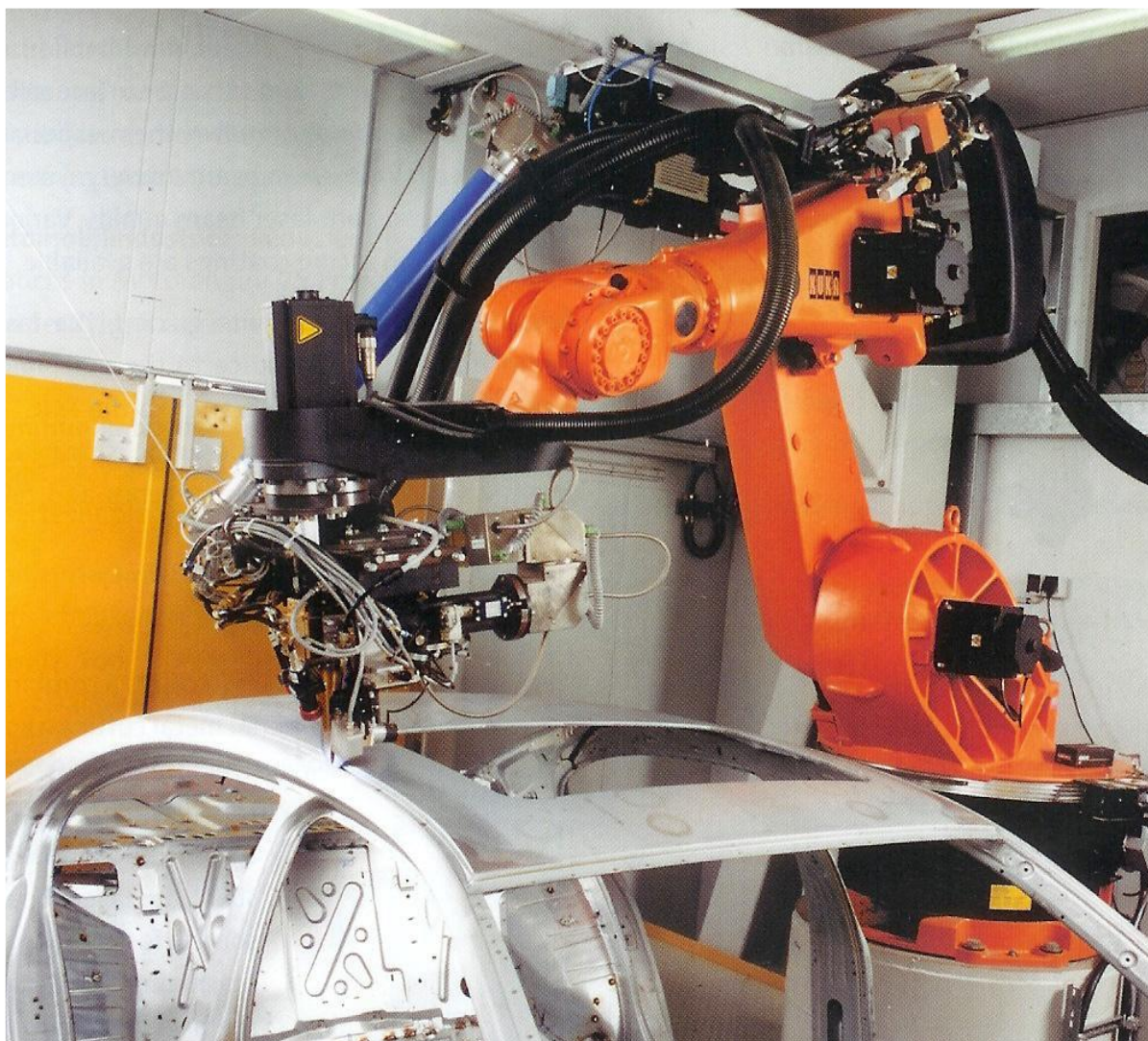


<b>3 EXPERIMENT .....</b>	<b>43</b>
3.1 Volba materiálu a posouzení svařitelnosti.....	43
3.1.1 Materiálová svařitelnost jemnozrné oceli Domex 700 MC .....	44
3.1.2 Technologická svařitelnost oceli Domex 700 MC pomocí laseru s obloukovým předehřevem metodou TIG .....	46
3.2 Provedení svarů .....	47
3.3 Zkouška tahem.....	49
3.4 Posouzení makrostruktury a mikrostruktury svaru.....	57
3.4.1 Makrostruktura svaru .....	59
3.4.2 Mikrostruktura svaru.....	63
3.5 Zkouška tvrdosti dle Vickerse .....	67
<b>4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ .....</b>	<b>72</b>
<b>ZÁVĚRY .....</b>	<b>73</b>
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam obrázků	
Seznam tabulek	
Seznam příloh	

## ÚVOD [13], [43], [52]

Lidská společnost zaznamenala v posledních desetiletích nebývalý vývoj. Je schopna produkovat mnohem složitější a důmyslnější zařízení nejen z hlediska konstrukce, nýbrž i z hlediska použitých materiálů, které jsou odolnější a snesou vyšší zátěž.

S vývojem těchto odolných materiálů roste i požadavek na mechanické pevnosti a odolnost svarů, kterými jsou dílce z těchto materiálů spojovány do větších konstrukčních celků. Z tohoto důvodu se do popředí zájmu (a to nejen svářecích technologů) průmyslové lasery, které umožňují vysokou rychlostí zhotovit velmi kvalitní svary a výsledným produktem jsou tudíž vizuálně pohledné svařence s vysokou přesností. Jako vše v životě lidském, má ovšem i svařování laserem mimo svých předností i své nedostatky. Výsostné poslání svářecích technologů proto spočívá ve vymýšlení nových postupů, které umožňují se s těmito nedostatky vypořádat. Na poli svařování je jednou z takových cest hybridní technologie LASER-TIG založená na vhodné kombinaci laserového svařování a obloukové metody TIG využívané za účelem předehřevu či dohřevu. Otázky „Co je míněno těmi nedostatky?“ a „Proč se technologové využívající laserové svařování ubírají právě touto cestou?“ se Vám pokusí alespoň částečně zodpovědět tato diplomová práce.



Obr. 1 Aplikace laserového svařování na poli strojírenského průmyslu [13], [37], [51]

# 1 ROZBOR ZADÁNÍ

Význam této kapitoly spočívá v učinění rozboru řešeného problému, v rámci něhož budou uvedeny možné varianty technologického řešení, a konečně návrh řešení, které se bude jevit optimálně jak z hlediska technického, tak i hlediska ekonomického.

## 1.1 Vymezení řešeného problému [40], [41], [42], [43]

Řešeným problémem je svařování pevnostní jemnozrnné oceli Domex 700 MC. Tato nízkolegovaná pevnostní ocel, jejíž příznivé mechanické vlastnosti jsou dány především zmíněnou jemnozrnností, se hojně využívá v nosných konstrukcích jeřábů, manipulátorů, plošinových přívěsů či kontejnerů, a to z důvodu jejich hmotnostní optimalizace. Mez kluzu tohoto materiálu je 700 MPa, mez pevnosti potom 750 až 950 MPa. Z toho nepřímo plynou vysoké požadavky na mechanické vlastnosti případných svarů. Cílem je tedy navrhnout řešení pro svařování tohoto materiálu a toto řešení následně experimentálně testovat při proměnných parametrech.

Prvně je třeba si uvědomit, že se jedná o svařování jemnozrnné oceli, u které by vnesením příliš velkého množství tepla mohlo dojít ke zhrubnutí zrna a tím poklesu jejích mechanických vlastností – proto se bude naše pozornost ubírat k technologiím, které umožňují velikost vneseného tepla prostřednictvím nastavení svařovacích parametrů regulovat. Mezi tyto patří:

- Svařování metodou MIG [1], [3], [10], [11], [13], [15], [26], [28], [36]

MIG (tedy „Metal Inert Gas“) (obr. 2) je označení pro metodu svařování inertní ochranné atmosféře (nejčastěji argonu) pomocí tavné elektrody – tou je drát mechanicky podávaný do svářecího hořáku. Inertní (netečný) plyn má v tomto procesu pouze funkci ochrannou – tj. chrání svarovou lázeň před možnou oxidací vlivem okolní atmosféry, aktivně však do chemických reakcí v rámci svařování nevstupuje. Metoda MIG je nejčastěji využívána pro svařování mědi, hliníku či titanu.



Obr. 2 Svařování metodou MIG/MAG [28]

- Svařování metodou MAG [1], [3], [10], [11], [13], [15], [26], [28], [36]

Metoda MAG („Metal Active Gas“) je založena na zcela stejném principu jako metoda MIG, pouze s tím rozdílem, že svařování probíhá v ochranné atmosféře aktivního plynu (nejčastěji oxidu uhličitého –  $\text{CO}_2$ ), který se aktivně účastní chemických reakcí v procesu svařování. Používá se pro svařování nelegovaných, nízkolegovaných a vysokolegovaných ocelí a v rámci průmyslu se proto jedná o nejrozšířenější metodu svařování prováděnou jak ručně, tak poloautomaticky, či automaticky.



- Svařování metodou TIG [1], [2], [3], [5], [10], [13], [14], [15]

Metoda TIG (tedy „Tungsten Inert Gas“) nazývaná někdy též jako metoda WIG (z německého „Wolfram Inert Gas“) spočívá ve svařování neodtavující se wolframovou elektrodou v inertní ochranné atmosféře (nejčastěji argonu nebo hélia) – viz obr. 3.

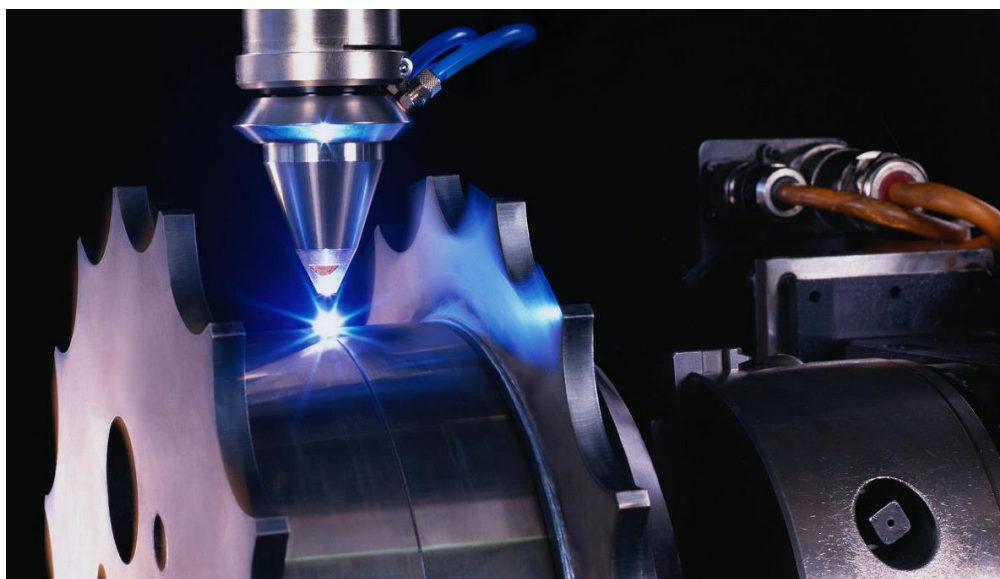
Jedná se většinou o proces ručního svařování s přídavným materiálem (podávaným nejčastěji ve formě drátu) nebo bez. Nejčastěji je metoda TIG využívána pro svařování hliníku, titanu, mědi, hořčíku, korozivzdorných a vysokolegovaných ocelí či kombinací různých materiálů (např. ocel s mědí, bronzem či dalšími materiály).



Obr. 3 Svařování metodou TIG [34]

- Svařování laserovým paprskem [1], [2], [3], [4], [13], [15], [37], [51], [52]

Při svařování laserem je laserový svazek zaostřen do budoucího místa svaru, kde vzhledem k velké plošné hustotě výkonu dochází k rychlému vývinu tepla na velmi malé oblasti – v rámci svařování je tak dosaženo zhotovení velmi štíhlých svarů s minimální tepelně ovlivněnou oblastí. Tato technologie nachází své uplatnění při svařování korozivzdorných či nízkouhlíkových ocelí, případně titanových, zirkonových, či chromniklových slitin a jiných, většinou obtížně svařitelných materiálů, případně kombinací materiálů. Výhodou svařování laserovým paprskem spočívá především v rychlosti svařování, tvorbě kvalitních a čistých svarů a v neposlední řadě i ve snadné automatizaci.



Obr. 4 Svařování laserovým paprskem [47]

## 1.2 Návrh řešení

S ohledem na nízkou hodnotu vneseného tepla se jeví optimálně svařování laserovým paprskem. Jedná se o technologii svařování prováděnou v drtivé většině případů bez přídavného materiálu; její výhodou (zejména z hlediska ekonomického) je rychlost svařování a možnost automatizace svářecího procesu, což se příznivě projeví zejména v případě svařování větších sérií. Stinnou stránkou této technologie, související právě s vývinem tepla na velmi malé oblasti, je vysoká rychlost ochlazování a s tím spojená tvorba zakalených struktur v rámci nerovnovážných strukturních přeměn. Aby bylo možné tvorbě těchto nerovnovážných struktur zabránit, je nutno snížit rychlost ochlazování. To se v praxi činí použitím předeřevu, případně dohřevu – za tímto účelem můžeme využít jako zdroje tepla využít:

- Ohřev plamenem [1], [3], [5], [13]

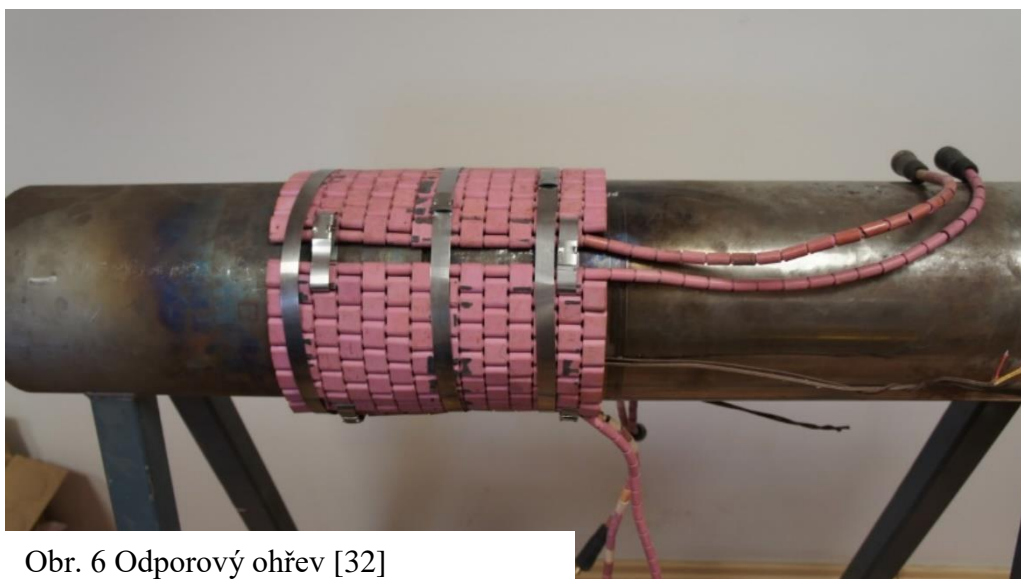
Použití plamene (obr. 5) je obecně jedním z nejjednodušších a nejčastěji používaných způsobů lokálního ohřevu kovových materiálů. Jako zdroj přídavného tepla přitom může posloužit plamen kyslíko-acetylenový, případně propan-butanový. Výhoda použití plamene spočívá v jeho operativnosti (nevyžaduje zdroj elektrické energie), v uživatelské přístupnosti a v nízkých pořizovacích nákladech. Nevýhodou pak je obtížná regulovatelnost teploty, obtížná fokusace ohřevu do malé oblasti materiálu (nejmenší plocha ohřevu je cca  $1 \cdot 10^{-2} \text{ cm}^2$ ) – to vše může v konečném důsledku vést k přílišnému vnesení tepla, případně i ke spálení povrchu ohřívajícího materiálu (oxidaci).



Obr. 5 Ohřev plamenem [33]

- Odporový ohřev [3], [5], [13], [32]

Vývinu tepla se v rámci odporového ohřevu docílí průchodem elektrického proudu odporovým drátem – množství takto generovaného tepla popisuje Joulovým zákonem

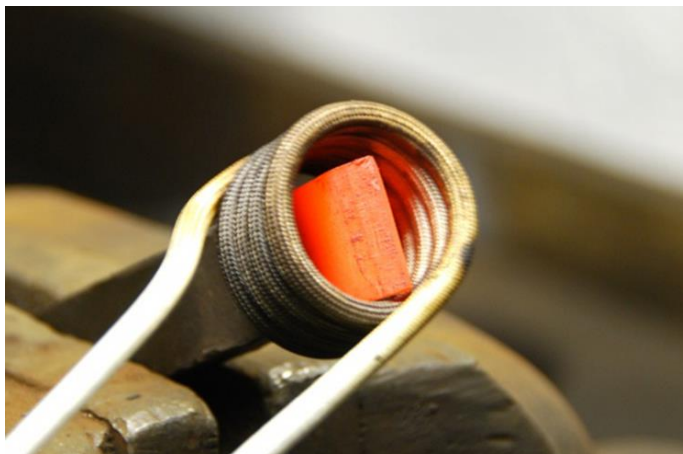


Obr. 6 Odporový ohřev [32]

v závislosti na velikosti elektrického odporu materiálu. Ohřev tohoto druhu může probíhat jak v pecích, tak prostřednictvím přenosných zdrojů – např. keramických tvarovek vyplněných odporovými dráty. Tyto tvarovky lze skládat do složitějších celků, čehož se s výhodou využívá případě ohřevu tvarově složitých dílců. Vzhledem k tomu, že teplo je ze zdroje do ohřívaného materiálu přenášeno vedením, je ohřev touto metodou poměrně zdlouhavý, špatně lokalizovatelný, leč teplotně přesně řízený. Hodí se tedy spíše pro aplikace, kde je třeba zajistit přesné řízení teploty v rámci celého teplotního cyklu – tj. ohřevu i ochlazování, nikoli však pro rychlý lokální ohřev.

- Indukční ohřev [1], [3], [5], [13]

Vnesení přídavného tepla do svařovaného materiálu prostřednictvím indukčního ohřevu je založeno na principu vývinu tepla prostřednictvím vířivých proudů – tyto jsou generovány induktorem, což může být cívka – viz obr. 7, případně smyčka vedená kolem ohřívané součásti. Vzhledem k tomu, že v rámci této metody ohřevu nedochází k přenosu tepla – tedy, že k vývinu tepla dochází přímo v ohřívaném dílci, je předností této metody zejména její vysoká účinnost a rychlost ohřevu; dále pak možnost lokalizace ohřevu vhodným tvarem či frekvencí induktoru a minimalizace povrchové oxidace. Druhou stranou mince jsou pořizovací náklady této technologie a možná obtížnost ohřevu tvarově složitějších dílců.

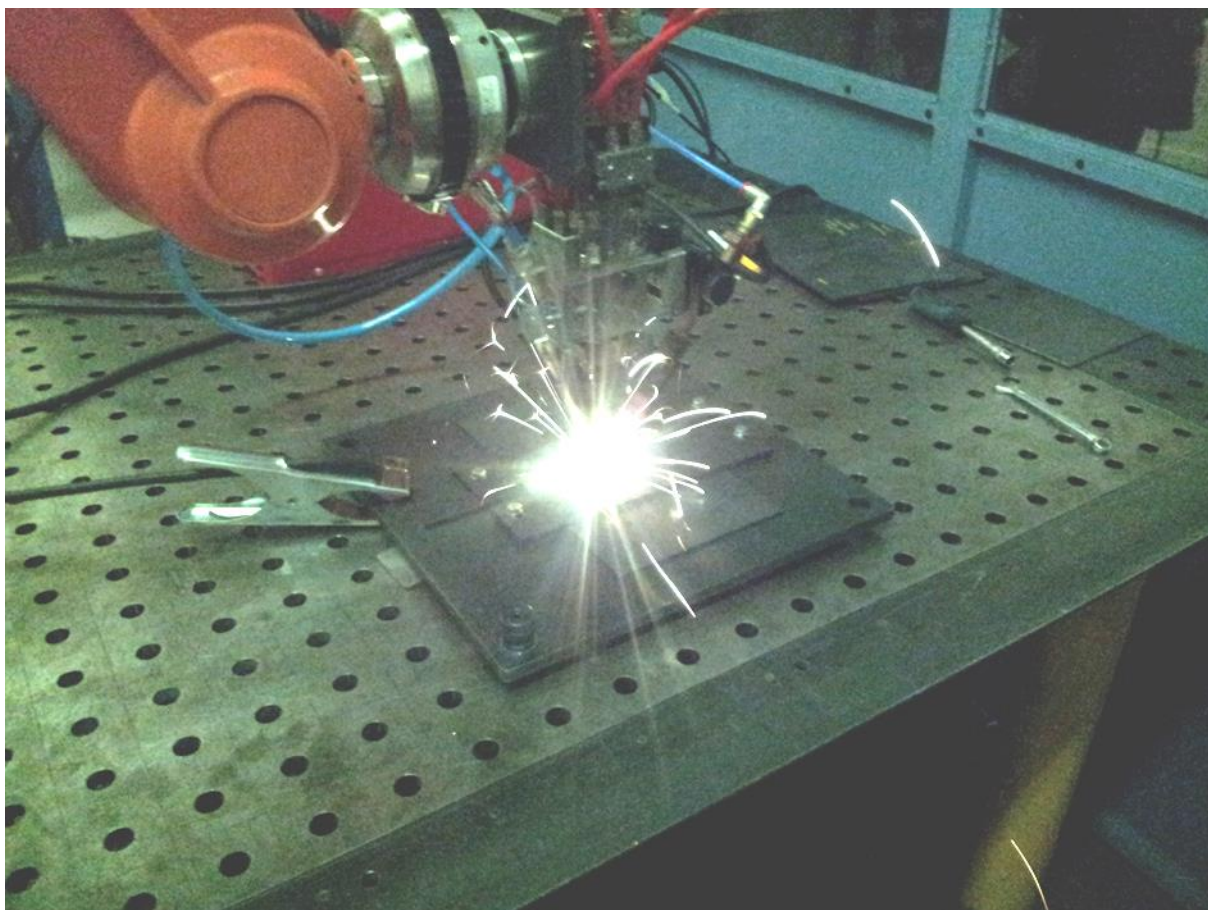


Obr. 7 Indukční ohřev [31]

- Ohřev obloukovou metodou [3], [7], [13], [14]

Metod využívajících k ohřevu materiálu elektrický oblouk se při svařování hojně využívá (- jedná se zejména o metody MIG/MAG nebo TIG) a to především s ohledem na jeho rychlost, operativnost a dobrou fokusovatelnost (- nejmenší plocha ohřevu cca  $1 \cdot 10^{-4} \text{ cm}^2$ ). V rámci ohřevu obloukovými metodami lze vhodně nastavovat svařovací parametry, čímž je dosaženo požadovaného vývinu tepla, nikoli však jeho natavení svařovaného materiálu. Laser a daná oblouková metoda bývají nezřídka kombinovány v jedné svařovací hlavě, což výrazně usnadňuje průběh svařovací operace, neboť proces přehřevu a samotného svařování probíhají v jednom technologickém kroku a není tudíž nutné manipulovat s ohřátými dílci. Právě díky těmto přednostem se kombinace obloukových metod a laserového svařování ustálila a v technickém pojmosloví se o ní často hovoří jako o hybridní metodě svařování. Vzhledem k tomu, že svařování laserem probíhá povětšinou bez přídavného materiálu, používá se (v případě, že podávání přídavného materiálu není požadováno) přehřev metodou TIG.





Obr. 8 Hybridní technologie LASER-TIG

S ohledem na požadavek přesné lokalizace a přesné regulace vneseného tepla se tedy nejvýhodněji jeví kombinace laserového svařování s obloukovým předehřevem – tedy volba hybridní metody svařování LASER – TIG. Uvedené výhody jsou znásobeny především rychlostí a efektivitou svařování, neboť proces předehřevu a svařování probíhají zároveň a v neposlední řadě i přijatelnými provozními náklady spojenými s touto technologií. V následující kapitole bude tedy tato technologie – tedy technologie laserového svařování podrobněji rozebrána za účelem získání teoretických poznatků pro zamýšlený experiment.

## 2 ROZBOR SVAŘOVÁNÍ LASEREM [1], [3], [4], [5], [7], [10], [13], [18], [20]

Technologie svařování laserem umožňuje zhotovení nerozebíratelného svarového spoje o vysoké kvalitě a spolehlivosti. Svařování laserovým paprskem probíhá v drtivé většině bez přídavného materiálu, jeho předností je zejména vysoká rychlost svařování. Tato technologie hraje v rámci strojírenského průmyslu (zejména v oblasti automotive) stále významnější roli, neboť umožňuje svařování materiálů, jež jsou běžnými konvenčními metodami obtížně svařitelné nebo dokonce nesvařitelné. Laserem tedy lze svařovat různé druhy ocelí, plastů, případně i obtížně svařitelné materiály s vysokou tepelnou vodivostí, jako je například hliník či barevné kovy (měď, mosaz atd.), případně materiály s vysokou teplotou tavení (wolfram, molybden, tantal, zirkon, titan aj.).

Výhody:

- vysoká svařovací rychlost
- svařování bez přídavného materiálu
- kvalitní a čistý svarový spoj s nízkou TOO
- průvarové spoje s vysokou štíhlostí
- vzájemná svařitelnost různých materiálů
- vysoká přesnost a snadná regulovatelnost
- bezkontaktní proces
- snadná automatizace
- zanedbatelná hlučnost oproti konvenčním technologiím svařování

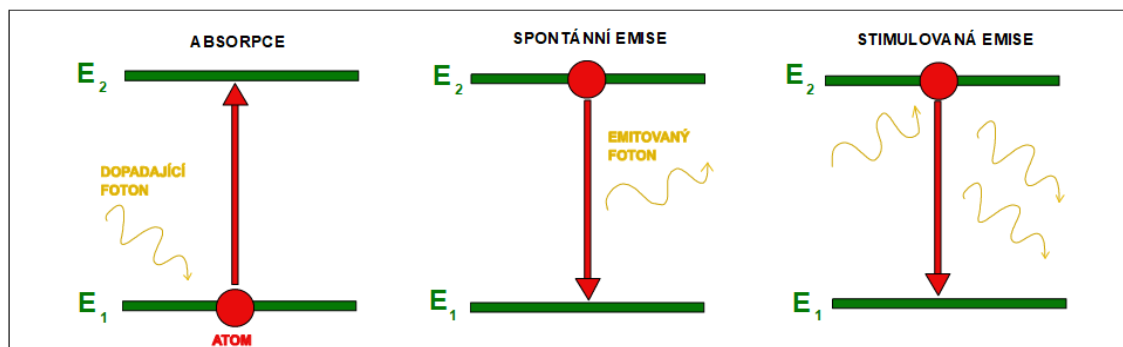
Nevýhody:

- vysoká počáteční investice
- požadavky na kvalifikaci obsluhy
- obtížnost přesného přípravkování

Jelikož cílem této práce není dopodrobna vysvětlovat fyzikální podstatu této technologie, nýbrž poukázat na možnosti využití této technologie pro technickou praxi, budeme se nadále ponejvíce zabývat právě těmito. Z druhé strany je však nutné si uvědomit, že pokud chceme nějaké věci v pravdě porozumět a pochopit její podstatu, je třeba ji zkoumat od základu, třebas zjednodušeného – a právě o to se pokusíme v následujících odstavcích.

### 2.1 Vznik laserového záření [3], [4], [13], [26], [27], [28], [37], [38], [48], [50], [51]

Základem zařízení laseru je aktivní prostředí – tj. médium schopné zesilovat procházející záření díky tzv. stimulované emisi. Zjednodušeně řečeno se jedná o fyzikální jev, který nastává při interakci fotonu s atomem případně molekulou. Obecně rozeznáváme tři typy interakce fotonu s atomem (nebo molekulou). Jsou to: absorpce, spontánní emise a stimulovaná emise záření – viz obrázek níže.



Obr. 9 Princip stimulované emise záření [12], [13], [20], [27]



Obrázek znázorňuje dvě energetické hladiny částice (elektronu) atomu daného materiálu (média) a to hladinu základní s nižší energií  $E_1$  a hladinu s vyšší energií  $E_2$ . Částice ležící na energetické hladině  $E_1$  má pak tendenci na této hladině setrvat, není-li jí dán impuls, lépe řečeno stimul ve formě dodané energie tento stav změnit. Tímto stimulem může být např. energie dodaná prostřednictvím fotonů dopadajících na atom s touto částicí. Je-li dostatečnou (tj.  $E_a = E_2 - E_1$ ) dojde k tomu, že atom tuto energii vstřebá (absorbuje) a jeho částice s konečnou pravděpodobností přejde z energetické hladiny  $E_1$  na energetickou hladinu vyšší úrovně  $E_2$ . Tento jev nazýváme absorpcí záření.

V případě, že se částice již na vyšší energetické úrovni  $E_2$  nachází, má takto nabuzená částice tendenci přejít do energeticky výhodnějšího stavu na nižší úroveň ( $E_1$ ) – při tomto dochází k vyzáření energie, jejíž velikost je rovna energetickému rozdílu těchto hladin (tj.  $E_e = E_2 - E_1$ ). Tomuto ději říkáme spontánní.

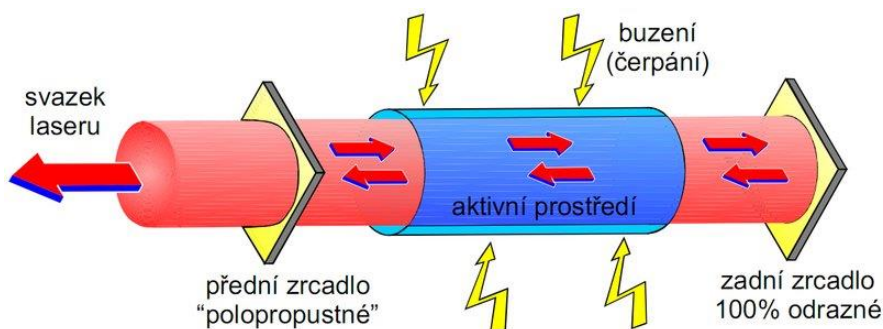
Může však nastat i stav, kdy se částice nachází na vyšší energetické hladině ( $E_2$ ) a zároveň na atom dopadá elektromagnetické vlnění o stejné frekvenci jako je frekvence emitovaného vlnění. Je přitom nenulová pravděpodobnost, že dopadající vlnění bude příčinou přechodu částice do energetického stavu  $E_1$  při současně emisi záření. Jelikož dopadající i emitované vlnění mají stejný směr a stejnou fázi, dochází k tomu, že se tato vlnění skládají, čímž je původní vlnění zesilováno – a právě to je principem tzv. stimulované emise záření. Nepřetržitý průběh stimulované emise záření je pak nutně podmíněn výskytem přebytku částí na vyšších energetických hladinách oproti množství částí na nižších energetických hladinách. Při nesplnění této podmínky by totiž došlo k opětovné absorpci takto uvolněné energie částicemi na nižších energetických hladinách.

Mezi specifické vlastnosti laserového záření patří zejména:

- Koherence – tzn. že všechny jeho vlny mají stejnou vlnovou délku, stejný směr a stejný fázový posun, a to bez ohledu na to, ze kterého místa emitujícího tělesa vycházejí.
- Monochromaticnost – všechny emitované fotony mají stejno frekvenci, což se navenek projevuje stejným zabarvením.
- Nízká divergence svazku – tj. jeho malá rozbíhavost – ta umožňuje dobrou fokusaci (zaostření) do velmi malého bodu pomocí optického systému, přičemž platí, že s vyšší vlnovou délkou záření je jeho fokusace obtížnější.
- Vysoká intenzita laserového svazku
- Možnost velmi krátkých pulzů
- Vysoká hustota výkonu
  - Intenzita slunečního světla  $10^2 \text{ W.cm}^2$
  - Svařování plamenem  $10^4 \text{ W.cm}^2$
  - Plasmový oblouk  $5 \cdot 10^5 \text{ W.cm}^2$
  - Pro kontinuální laser až  $10^8 \text{ W.cm}^2$
  - Pulzní laser  $10^9$  až  $10^{14} \text{ W.cm}^2$
- Široký rozsah možných vlnových délek – poskytuje široké možnosti aplikací v různých oborech

## 2.2 Princip laserového zařízení [1], [3], [4], [13], [20], [27]

Jak již bylo zmíněno v předchozí podkapitole, základní komponentou laserového zařízení je aktivní prostředí, v níž probíhá stimulovaná emise záření – ta je podmíněna přebytkem částic ve vyšším energetickém stavu, což obstarává zdroj energie. Stěžejní součástí laseru je pak tzv. optický rezonátor. Jedná se ve své podstatě o válec (v němž se aktivní prostředí nachází), na jehož jednom konci se nachází plně odrazné zrcadlo ( $R=100\%$ ) a na druhém konci zrcadlo polopropustné ( $R=95\%$ ). Takováto konstituce zajišťuje dosažení vyššího počtu stimulovaných přechodů oproti přechodům spontánním. V principu to znamená, že záření odražené od zrcadla vstupuje zpět do aktivního prostředí a slouží jako podnět pro další stimulovanou emisi. Dosáhne-li svazek požadované intenzity, prochází tento polopropustným zrcadlem do optického systému.

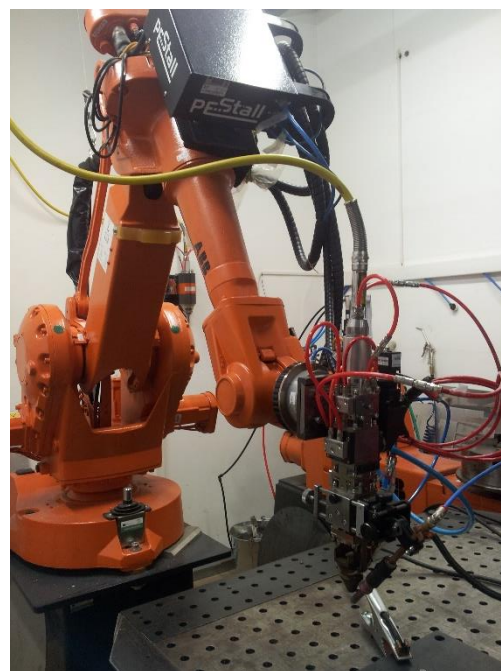


Obr. 10 Schématické znázornění principu laserového zařízení [1], [3], [4], [13], [20], [27]

Optický systém (nebo též optická soustava) je systémem čoček a clon sloužících k úpravě kvality svazku a jeho průměru. Tento tzv. expandér rovněž zajišťuje snížení divergence (tj. rozbíhavosti) svazku. Nežádoucím vlivem, který je s činností optické soustavy spojen, je snižování účinnosti laserového zdroje. Ve většině průmyslových aplikací je však důležitější kvalita laserového svazku. Upravený svazek je soustavou zrcadel a čoček (případně optickým vláknem) veden do tzv. laserové hlavy, jejímž prostřednictvím je posléze aplikován dle požadavků uživatele. – Vzhledem k tomu, že buzení aktivního prostředí vyžaduje značné energie, které není dosahováno beze ztrát, rovněž přenos laserového záření optickou soustavou do laserové hlavy je doprovázen značným vývinem tepla, musí být celé zařízení vybaveno dostatečně dimenzovaným chladicím zařízením.

Konečně, všechny průmyslové lasery jsou řízeny prostřednictvím řídícího počítače – ten zajišťuje řízení parametrů optické soustavy, laserové hlavy a dalších technologických a pomocných systémů. V neposlední řadě je přes řídicí počítač ovládán pohyb laserové hlavy či jednotlivých lineárních, popřípadě rotačních os laserové stanice.

Laserovou stanicí pak můžeme nazvat kompaktní konstrukční celek skládající se ze soustavy pracovních lineárních a rotačních os, příp. robotů a manipulátorů uspořádaných na základovém rámu. Tyto umožňují přesný pohyb aplikovaného svazku, resp. pohyb dílu (např. obrobku či svařence).

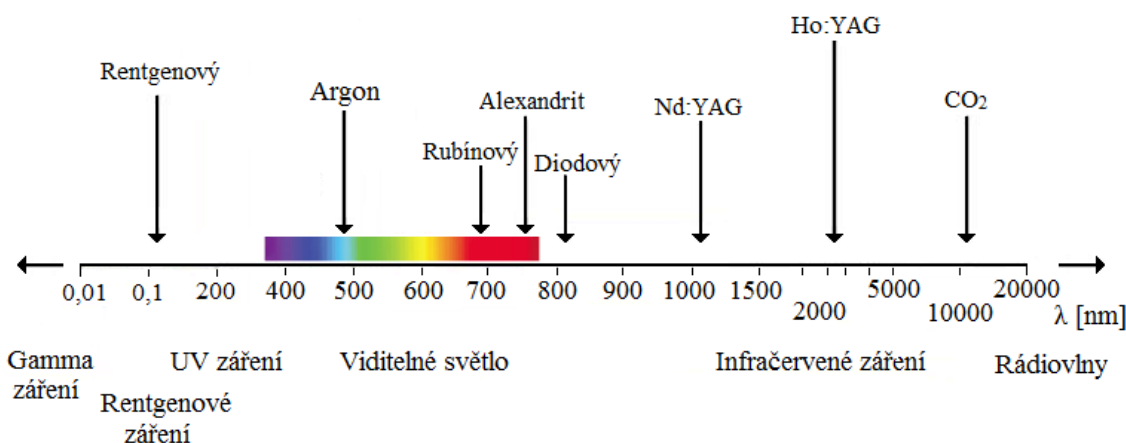


Obr. 11 Příklad laserové stanice – ÚPT Akademie věd Brno

## 2.3 Rozdělení a typy průmyslových laserů [1], [3], [4], [12], [13], [20], [27]

V současnosti se laserová zařízení (zkráceně lasery) využívají v mnoha odvětvích, což je doprovázeno jejich typovou rozmanitostí, přičemž každý typ má své výhody a nevýhody právě ve vztahu k určité oblasti použití. Průmyslové lasery používané pro technologické operace – mezi něž řadíme i svařování, pak můžeme dělit do různých skupin v závislosti na jejich konstrukci, vlastnostech, způsobu čerpání energie nebo oblasti použití:

- Z hlediska druhu aktivního prostředí rozlišujeme:
  - Pevnolátkové
  - Polovodičové
  - Plynové
- Dle oblasti vlnových délek rozeznáváme:
  - Lasery infračervené (780 nm až 1 mm)
  - Lasery viditelného pásma (360 nm až 780 nm)
  - Lasery ultrafialové (10 nm až 360 nm)
  - Lasery rentgenové
- S ohledem na používaný režim práce pak lasery:
  - Pulzní
  - Kvazikontinuální
  - Kontinuální
- Z hlediska uspořádání aktivního prostředí známe tyto typy laserů:
  - Diskové
  - Polovodičové
  - Vláknové
  - Tyčové
  - Diodové



Obr. 12 Rozdělení laserů (nejen průmyslových) z hlediska vlnových délek [4], [7], [13], [18]

S ohledem na uvedená rozdělení se podrobněji seznámíme s průmyslovými lasery, jež se v technické praxi ke svařování užívají nejčastěji – jedná se o lasery plynové CO<sub>2</sub>, dále pevnolátkové polovodičové.

### 2.3.1 Plynové CO<sub>2</sub> – lasery [4], [12], [13], [20], [26], [27], [28], [49], [50], [51], [52]

Jak již samo označení napovídá, aktivním prostředím CO<sub>2</sub> laserů je tvořeno především molekulami oxidu uhličitého, dále pak helia a dusíku. Helium zabraňuje rozptylu tepla v aktivním prostředí a dusík slouží k absorpci energie, jež je zapotřebí k nabuzení. Tato energie má svůj původ v elektrickém výboji, který tuto směs plynu zapaluje.

CO<sub>2</sub> lasery se obecně vyznačují nízkou účinností, která dosahuje 5 až 10 %. (Donedávna byly jediným typem laseru široce využívaným pro opracování kovů, neboť do té doby výbojkami čerpané Nd:YAG lasery nestačily svým výkonem požadavkům na ně kladeným.) Problematickou CO<sub>2</sub> laserů je ovšem vedení emitovaného laserového paprsku o vlnové délce 1060 nm, pro které již nelze využít optických kabelů a musí tudíž být zajištěno soustavou zrcadel – přičemž tato zrcadla vyžadují pravidelnou kalibraci, čištění a údržbu. Mezi nejrozšířenější průmyslové CO<sub>2</sub> lasery patří lasery o vyšším výkonu cca do 20 kW, které mohou být využívány pro svařování a řezání kovů.

Výhody:

- vysoký výkon
- vysoká spolehlivost
- nízké provozní náklady
- dlouhá životnost

Nevýhody:

- komplikované vedení paprsku
- nutné zajištění odvodu tepla
- častá údržba a kontrola zrcadel

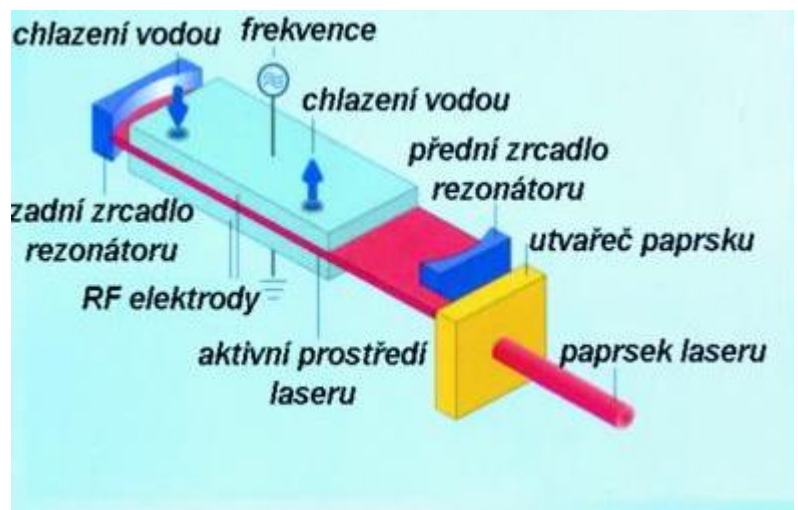
Nejmodernější verzí CO<sub>2</sub> laseru je difúzně chlazený SLAB laser, pro jehož buzení je využíváno vysokofrekvenční vlnění. Buzení samotné pak probíhá mezi dvěma velkoplošnými měděnými elektrodami, jež zároveň skrze rozptyl chladicí kapaliny zajišťují i odvod tepla – tedy chlazení plynu v rezonátoru. Diskové SLAB lasery se vyznačují vysoce kvalitním výstupním laserovým paprskem, a především velmi nízkými náklady na provoz a údržbu.

Výhody:

- výborná kvalita výstupního paprsku
- nízká spotřeba energie
- nízké provozní náklady
- vysoká spolehlivost
- dlouhá životnost

Nevýhody:

- nižší výkon (cca do 5 kW)



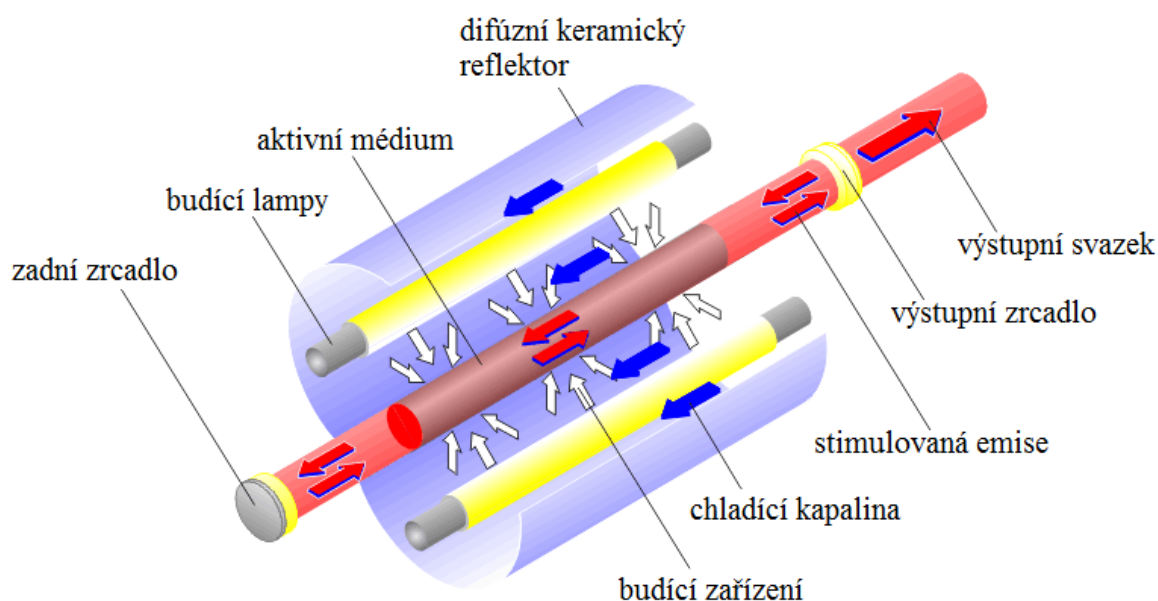
Obr. 13 Schematické znázornění SLAB laseru [13], [20], [27]

### 2.3.2 Pevnolátkové lasery [4], [12], [13], [20], [26], [27], [28], [49], [50], [51], [52]

Pevnolátkové lasery jsou takové, u nichž aktivní prostředí představuje dielektrikum – opticky propustná látka (např. na bázi krystalu, skla či keramiky), jejíž vlastnostmi jsou optická homogenita, průhlednost, a kterou je možno uměle vyrobit za použití současných technologických postupů. Mimoto všechny druhy aktivního prostředí musí být schopny absorbovat energii a posléze ji emitovat ve formě světelného záření – takovéto materiály označujeme jako luminofory.

Mezi nejznámější představitele pevnolátkových laserů patří Nd:YAG lasery (tj. yttrium aluminium granátový lasery dopované neodymem), jejichž prudký rozvoj byl pro strojírenskou technologii, ale i průmysl celkově asi nejzásadnějším. Zvláštní podskupinou pevnolátkových laserů jsou lasery vláknové, kam můžeme řadit lasery Yb:YAG (yttrium aluminium granátové laser dopovaný yterbiem), které patří mezi špičku v oblasti pevnolátkových laserů a které budou v rámci svařování v blízké budoucnosti čím dál tím hojněji využívány. S těmito dvěma typy se tedy v následujících odstavcích stručně seznámíme.

Aktivní prostředí Nd:YAG laseru tvoří matrice uměle vytvořeného krystalu  $Y_3Al_5O_{12}$  (tj. yttrium aluminium granátu), jež je dopována ionty Nd (tj. neodymu). Tento druh laseru umožňuje provoz jak v pulzním, tak i kontinuálním režimu. Mezi jeho přednosti patří skutečnost, že vyzářený paprsek o vlnové délce 1060 nm může být veden prostřednictvím optického vlákna, což je výhodné zejména z hlediska konstrukce svařecích robotů.

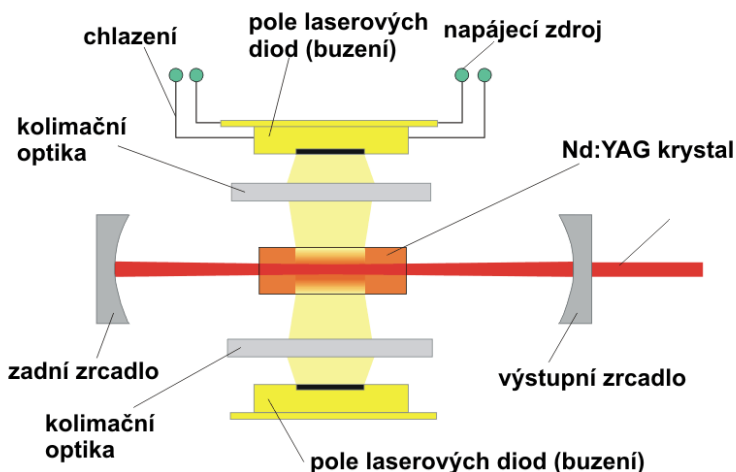


Obr. 14 Schéma výbojkami buzeného Nd:YAG laseru [26], [29], [44], [45]

Jak již bylo řečeno dříve, Nd:YAG lasery prošly dlouhým vývojem – mezi ty první patřily Nd:YAG lasery buzené výbojkami, jež byly schopné pracovat s velkou energií v rámci pulzního režimu a dnes se (vzhledem k tomu, že jsou vývojově překonané) vyznačují poměrně nízkými pořizovacími náklady. Z druhé strany z hlediska samotného provozu vyžadují tyto intenzivní chlazení, z čehož nepřímo plyne jejich nižší účinnost. Další nevýhodou jsou vyšší provozní náklady související s potřebou častých výměn výbojek, k čemuž se váže nutnost časté údržby.



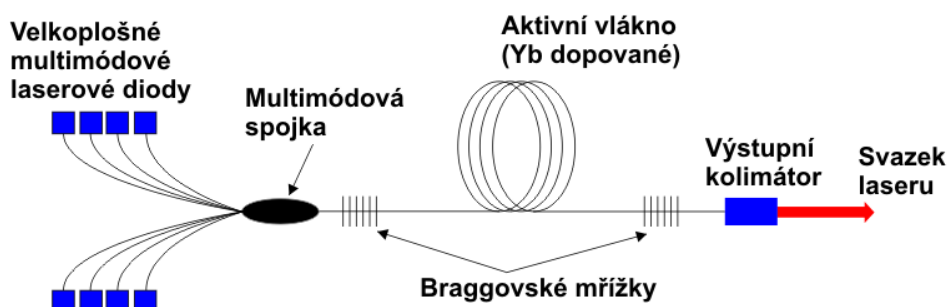
Tyto stinné stránky výbojkami buzených pevnolátkových laserů byly odstraněny tím, že se k buzení Nd:YAG laseru začaly využívat polovodičové diody. To umožnilo rozmach kompaktních pevnolátkových laserů, které obecně dosahují vyšších výkonů, vyšší účinnosti, delší životnosti, přičemž podobně jako v případě dřívější koncepce Nd:YAG laserů je možné vést emitovaný svazek optickým vláknem.



Obr. 15 Schéma diodami buzeného Nd:YAG laseru [13]

Zatím posledním vývojovým stupněm v oblasti průmyslových Nd:YAG laserů je laser diskový, jehož tvar aktivního prostředí umožňuje dosáhnout vysokého výkonu (až 16 kW), což je v oblasti svařování jistě přínosem. Tyto lasery se vyznačují vysokou kvalitou emitovaného paprsku (vyznačují se možností dobrého zaostření), vykazují však nižší účinnost a životnost ve srovnání s lasery vláknovými.

Zvláštní podskupinou pevnolátkových laserů, jež patří mezi technologicky nejmodernější jsou lasery vláknové Yb:YAG, jejichž aktivní prostředí je tvořeno optickým vláknem dopovaným yterbiem a je buzeno prostřednictvím laserových diod. K vedení laserového svazku se pak namísto zrcadel využívá tzv. Braggovských mřížek, což jsou struktury zakomponované přímo na optickém vlákně (obr. 16); samotný výstupní paprsek o vlnové délce 1070 nm je pak vyzářen pomocí optického kolimátoru. Tyto lasery mohou pracovat v režimu pulzním, kvazipulzním i kontinuálním, vyznačují se konstrukční jednoduchostí, vysokou účinností (až 35%), nízkými provozními náklady, a především modularitou a možností skládat tyto moduly do větších celků za účelem dosažení vyššího výkonu (až cca 100 kW). V neposlední řadě dosahují vysoké pracovní životnosti, která se pohybuje řádově v desítkách tisíc hodin.



Obr. 16 Schematické znázornění vláknového Yb:YAG laseru [13]

Tab. 1 Souhrnný přehled vlastností pevnolátkových laserů (pozn. jsou sem zahrnuty i lasery polovodičové, které jsou však obvykle uváděny jako zvláštní podskupina pevnolátkových laserů)

Souhrnný přehled kladných a záporných aspektů při volbě výše uvedených pevnolátkových laserů		
Druh pevnolátkového laseru	Výhody	Nevýhody
Nd:YAG buzený výbojkami	nízká investiční náročnost	omezení z hlediska výkonu
	velká energie v pulzním režimu	potřeba intenzivního chlazení
	vedení paprsku optickým vláknem	nízká účinnost
		vyšší provozní náklady a nutnost časté údržby
Nd:YAG buzený polovodičovými diodami	vyšší výkon	vyšší počáteční investice
	vyšší účinnost	
	menší požadavky na chlazení	
	vedení paprsku optickým vláknem	
	delší životnost	
Nd:YAG diskový	vysoký výkon	nižší účinnost (15 – 20%)
	vysoká kvalita výstupního paprsku	nižší životnost
	vedení paprsku optickým vláknem	vysoká počáteční investice
	kompaktní konstrukce	
Yb:YAG vláknový	modularita (=> vyšší výkon)	vysoká počáteční investice
	vysoká účinnost (až 35%)	
	konstrukční jednoduchost	
	robustnost	
	vysoká kvalita výstupního paprsku	
	dlouhá pracovní životnost (řádově v desítkách tisíc hodin)	
	nejnižší provozní náklady v rámci pevnolátkových laserů	
Polovodičový laser	vysoká účinnost (až 60%)	nekvalitní výstupní paprsek
	vysoká kompaktnost a nízká hmotnost	práce pouze v kontinuálním režimu
	široká škála výkonů (od 50 do 6000 W)	
	nízké provozní náklady	

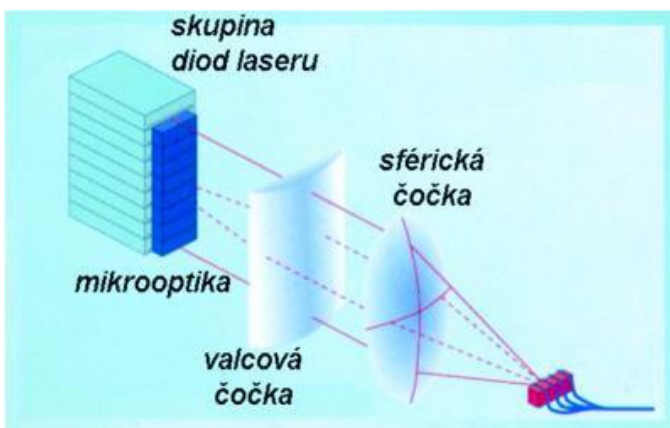
### 2.3.3 Polovodičové (diodové) lasery [4], [12], [13], [20], [27], [28], [49], [50], [52]

O laserech diodových (nebo též polovodičových) hovoříme tehdy, je-li aktivním prostředím silně dopovaný polovodič – krystal obsahující PN přechod. Jeho výkon ovšem dosahuje pouze několika miliwattů – chceme-li jej zesílit, je třeba tak učinit spřažením řady laserových diod buď do sloupců (výkon až 600 W) nebo do bloků pro dosažení výkonu řádově několik kW.

Svazek vystupující z rezonátoru se vyznačuje v horizontálním a vertikálním směru různým profilem i divergencí (tj. Rozbíhavostí) – toto je korigováno válcovými a sférickými mikročočkami (obr. 17), ze kterých již vystupují rovnoběžné svazky, nicméně ani kvalita takového svazku není ve srovnání s jinými typy laserů nikterak oslnivá a používá se proto zejména v aplikacích, jež nevyžadují fokusaci laserového paprsku na příliš malou plochu, naopak je žádoucí větší průměr – těmito aplikacemi jsou zejména povrchové úpravy materiálů, svařování atd.

Mezi hlavní přednosti diodových laserových systémů patří bezesporu jejich nízká hmotnost, vysoká kompaktnost, a především vysoká účinnost, jež běžně dosahuje 40%, výjimečně až 60%. Zmíněná kompaktnost diodových laserů umožňuje jejich umístění např. na rameno robota, čehož je nezdědkou využíváno v rámci svařování tvarově náročných součástí v automotive, kde se používají polovodičové lasery o výkonu řádově několika kW. Nevýhodou polovodičových laserů je schopnost pracovat pouze v kontinuálním režimu a jejich nepříliš dobře fokusovaný výstupní laserový svazek, jenž má hranatý profil a nelze jej proto zaostřit do malého bodu. Této nevýhody se však s úspěchem využívá např. pro kalení, kde je tento jev žádoucí, a nemusí být tudíž použita speciální optika pro modifikaci laserového svazku.

Výhody/nevýhody viz v tabulce 1.

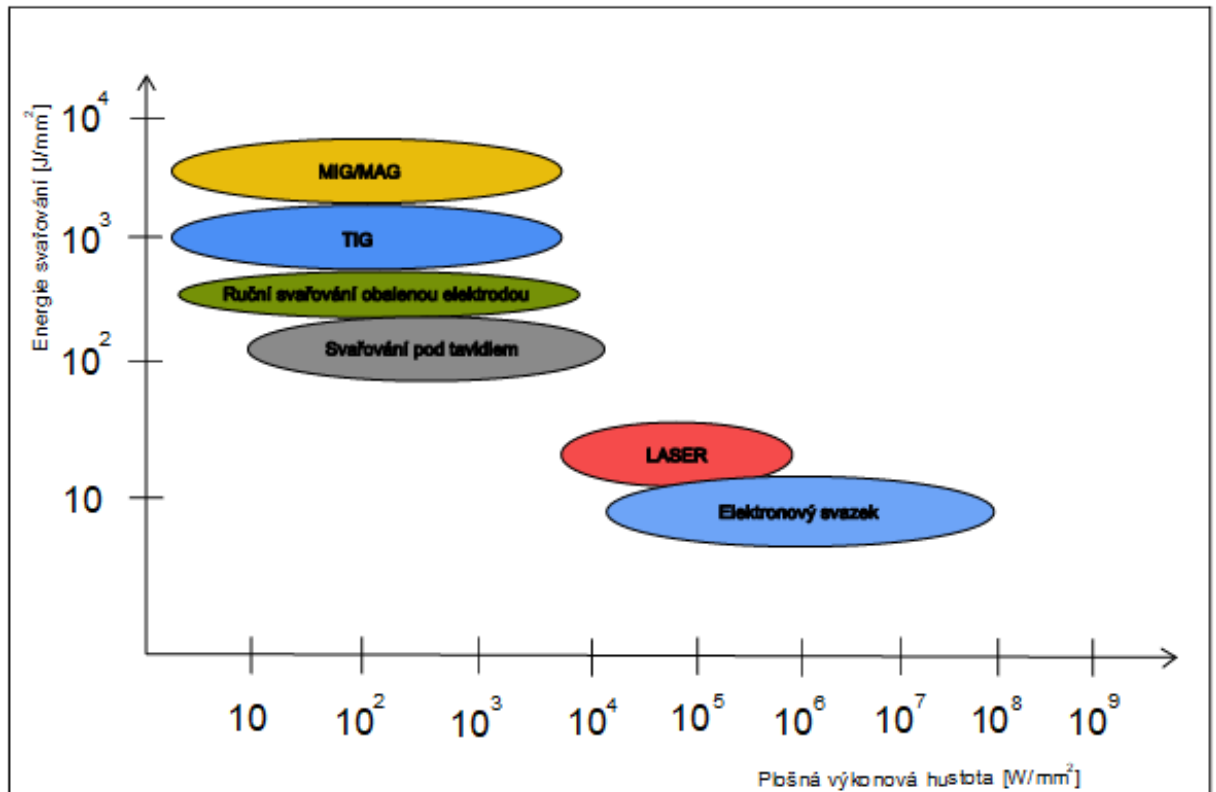


Obr. 17 Korekce laserového paprsku emitovaného diodovým laserem [12], [13], [20], [48], [50], [51]



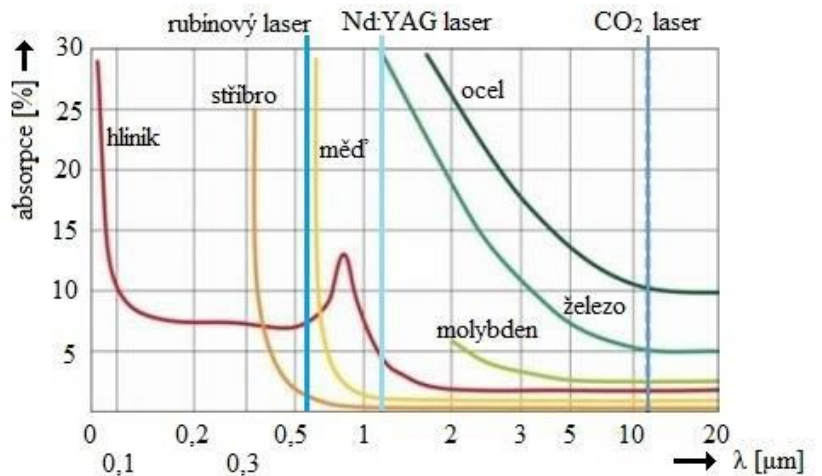
## 2.4 Princip laserového svařování [26], [29], [44], [45]

Při laserovém svařování je fokusovaný laserový svazek zdrojem záření s velmi vysokou plošnou hustotou výkonu, který v cílovém materiálu způsobí rychlý lokální ohřev, natavení, následné spojení a ochlazení materiálu. Zhotovené svary pak díky vysoké dynamice těchto jevů vykazují minimální tepelně ovlivněnou oblast, svařence jako takové pak minimální tepelnou deformaci, popř. vnitřní pnutí v rámci svařovaných materiálů.



Obr. 18 Plošná hustota výkonu různých technologií svařování [12], [13], [20]

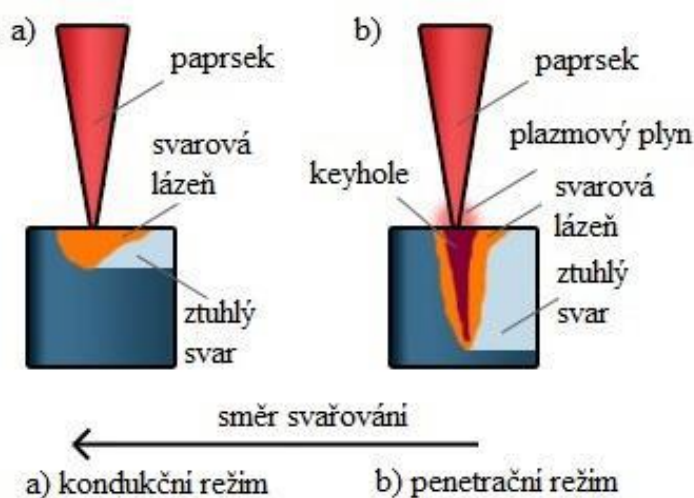
Má-li být aplikace laserového systému účinná, je jedním z určujících parametrů laseru vlnová délka jeho záření, neboť každý materiál má různou absorptivitu (tj. pohltivost) záření v závislosti na jeho vlnové délce. Obecně lze říci, že absorptivita kovových materiálů s rostoucí vlnovou délkou záření klesá; z druhé strany roste s nárůstem teploty a drsností plochy na níž záření dopadá. Od toho, jak je schopen materiál pohlcovat energii záření, (což se projevuje vývinem tepla a navenek zvýšením teploty) je pak odvislá i pracovní rychlost, případně tepelné ovlivnění materiálu v místě svařování. V případě, že materiál energii vyzařovanou z laseru nepohltí, dojde k jejímu odrazu; transmisivitu (tj. schopnost materiálu propouštět záření) můžeme považovat za nulovou.



Obr. 19 Absorptivita (pohltivost) vybraných materiálů [7], [13]

Z hlediska účinku laserového paprsku na svařovaný materiál (jenž vychází z absorptivity materiálu vůči danému záření a plošné hustoty výkonu laserového svazku) se rozlišují dva režimy svařování – a to kondukční a penetrační.

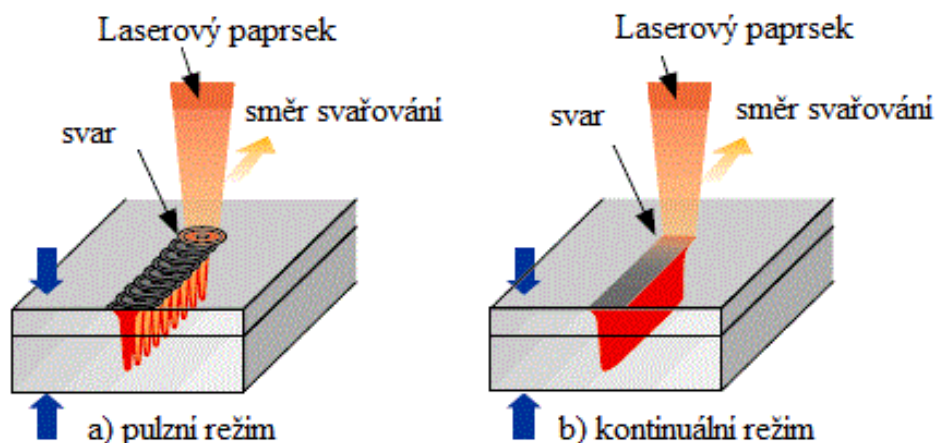
Kondukční režim (obr. 20 a)) se vyznačuje nižší plošnou hustotou výkonu než režim penetrační (cca  $10^6 \text{ W.cm}^{-2}$ ). Při těchto hodnotách se uplatňuje přenos tepla a tvarování svarové lázně kondukcí (tj. vedením), přičemž prakticky nedochází k odpařování svařovaného materiálu. Pro svary zhotovené tímto režimem je pak charakteristicky menší průvar (tj. hloubka svaru), větší šířka a tím pádem i větší tepelně ovlivněná oblast. Tohoto režimu je obecně využíváno spíše pro svařování tenkých plechů, případně fólií, kde je postačující menší hloubka průvaru.



Obr. 20 Kondukční a penetrační režim laserového svařování [12], [13], [20]

Naproti tomu při režimu penetračním (obr. 20 b)) dosahuje plošná hustota výkonu až cca  $5 \cdot 10^8 \text{ W.cm}^{-2}$ ), což je již postačující pro to, aby se nad svařovaným povrchem materiálu začaly tvořit páry, které vlivem energie z laserového svazku ionizují a dochází ke vzniku plazmového obláčku. Vysoká plošná hustota výkonu laserového svazku zapříčiní v rámci svarové lázně vznik úzké kapiláry – tzv. keyhole (v překladu klíčové dírky), z níž pod vysokým tlakem proudí plyny přehřátého kovu, jež brání uzavření této kapiláry. Růst kapiláry je zastaven, dojde-li k poklesu plošné hustoty výkonu pod určitou kritickou hodnotu – za tímto poklesem může stát divergence laserového svazku, absorpce energie stěnami keyhole, případně tepelnými ztrátami (tedy odvod tepla do okolí materiálu). Ke zhotovení samotného svaru pak dojde tak, že tavenina kovu, vzniknuvší na čele stěny, proudí v důsledku dynamické rovnováhy tlaku plynů a tekutého kovu kolem stěn svarového kanálku na zadní stěnu, kde se tento slévá, zaplňuje volný prostor a následně tuhne. Obecně lze tímto režimem dosáhnout úzkého a hlubokého svaru s poměrně malou tepelně ovlivněnou oblastí, čehož se využívá pro svařování profilů a plechů větších tloušťek. K penetračnímu režimu je dále nutno podotknout, že plazmový obláček vznikající nad svarovou lázní znatelně snižuje hloubku průvaru, neboť pohlcuje velkou část laserového záření, čímž zabraňuje pronikání fotonů do svarové spáry. Abychom tomuto zamezili, používá se pro odstranění nebo částečného odchýlení obláčku plazmy ochranných plynů – např. He, N<sub>2</sub>, Ar, případně směs plynů Ar + CO<sub>2</sub> – které zároveň zabraňují oxidaci materiálu vzdušným kyslíkem a vzniku případných vnitřních defektů (póry, plynové bubliny apod.).

Z hlediska spojitosti emise laserového paprsku lze z principu rozeznávat dva režimy svařování – a sice pulzní a kontinuální (viz obr. 21). O pulzním režimu hovoříme tehdy, je-li laserové záření emitováno po předchozí akumulaci energie ve formě krátkých impulzů. Tento režim se využívá nejčastěji pro bodové, případně švové svařování. V případě, že jsou tyto pulzy delší, je tento režim svařování v rámci odborné literatury nazýván jako kvazikontinuální (tj. zdánlivě kontinuální). Je-li emise laserového paprsku spojitá, pak se jedná výhradně o režim kontinuální, energie paprsku je přibližně konstantní a závislost výkonu na čase vykazuje lineární charakter.



Obr. 21 Pulzní a kontinuální režim laserového svařování [12], [13], [20], [27]

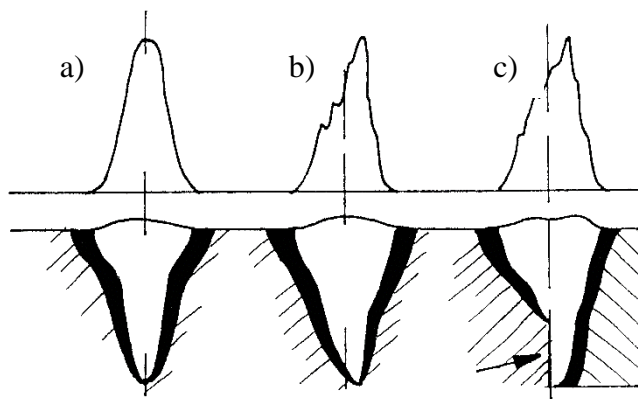
## 2.5 Parametry laserového svařování [4], [6], [12], [13], [20], [27]

Pro efektivní využití laseru v rámci technologie svařování je nutné dbát optimálního nastavení (případně alespoň zohlednění) několika parametrů, které významně ovlivňují průběh a tím i výsledek svařovacího procesu – jsou jimi:

- Rychlost svařování
- Režim svařování (kontinuální x pulzní)
- Vlnová délka laserového svazku
- Výkon a plošná hustota výkonu paprsku (souvisí s vlastnostmi laserového svazku)
- Vlnová délka + absorptivita (- úhrnem tedy vlastnosti) svařovaných materiálů
- Parametry fokusačního systému (tj. optika svařovací hlavy)
- Poloha ohniska zaostřovaného paprsku vzhledem k trysce a povrchu materiálu
- Volba ochranného plynu a nastavení jeho průtoku

Oproti konvenčním technologiím svařování se v případě svařování laserem nemusí příliš zohledňovat čistota svařovaných plechů z toho hlediska, že je není nutné odmašťovat, neboť s ohledem na vysokou intenzitu laserového svazku jsou případné nečistoty odpařeny ještě vznikem svarové lázně.

Mimo tyto parametry je při svařování nutno dbát optimálního namíření a fokusaci laserového svazku mezi svařované materiály – je-li toto zanedbáno, výsledkem mohou být nesymetrické svary (obr. 22), případně studené spoje (dojde k neprovaření materiálu). Nutno poznamenat, že i struktura takto nesprávně zhotoveného svaru se může na obou stranách spoje lišit – a to jak v rámci svaru samotného, tak v rámci tepelně ovlivněné oblasti.



a) symetrický svar  
b) nesymetrický svar  
c) studený spoj (vyznačen šipkou)

Obr. 22 Tvary průvarů (spodní část obrázku) při různém rozložení energie (horní část obrázku) dopadajícího laserového svazku [4]

## 2.6 Svařitelnost nízkolegovaných ocelí [1], [3], [10], [23], [24]

Svařitelnost kteréhokoli materiálu (tedy nejenom ocelí) je komplexní charakteristika, která vyjadřuje vhodnost materiálu vytvořit svarový spoj požadovaných mechanických, fyzikálních a chemických vlastností při určitých metalurgických, konstrukčních a technologických možnostech. Cílem každého svářecího procesu je docílení požadované jakosti, spolehlivosti a životnosti svarového spoje. Svařitelnost materiálu lze posuzovat ze tří základních hledisek, kterými jsou:

- a) Materiálová svařitelnost – což je vlastnost vyjadřující, jak je materiál vhodný ke svařování a charakterizuje změnu jeho vlastností v tepelně ovlivněné oblasti v důsledku působení teplotního cyklu svařování. Vhodnost materiálu ke svařování je dána především způsobem jeho výroby – např. chemickým složením, způsobem odlévání, tváření a jeho tepelným zpracováním.
- b) Technologická svařitelnost – tato vyjadřuje vliv použité technologie svařování na vlastnosti svarového spoje a je určena základními faktory jako je metoda svařování, volba přídavného materiálu a volba vhodných parametrů v rámci svařovacího procesu.
- c) Konstrukční svařitelnost – vyjadřuje vliv konstrukčního řešení svarového spoje pro dané provozní podmínky. Je podmíněna zejména tloušťkou materiálu, tvarem svarového spoje, přípravou svarových ploch, možnou kumulací svarů atd.

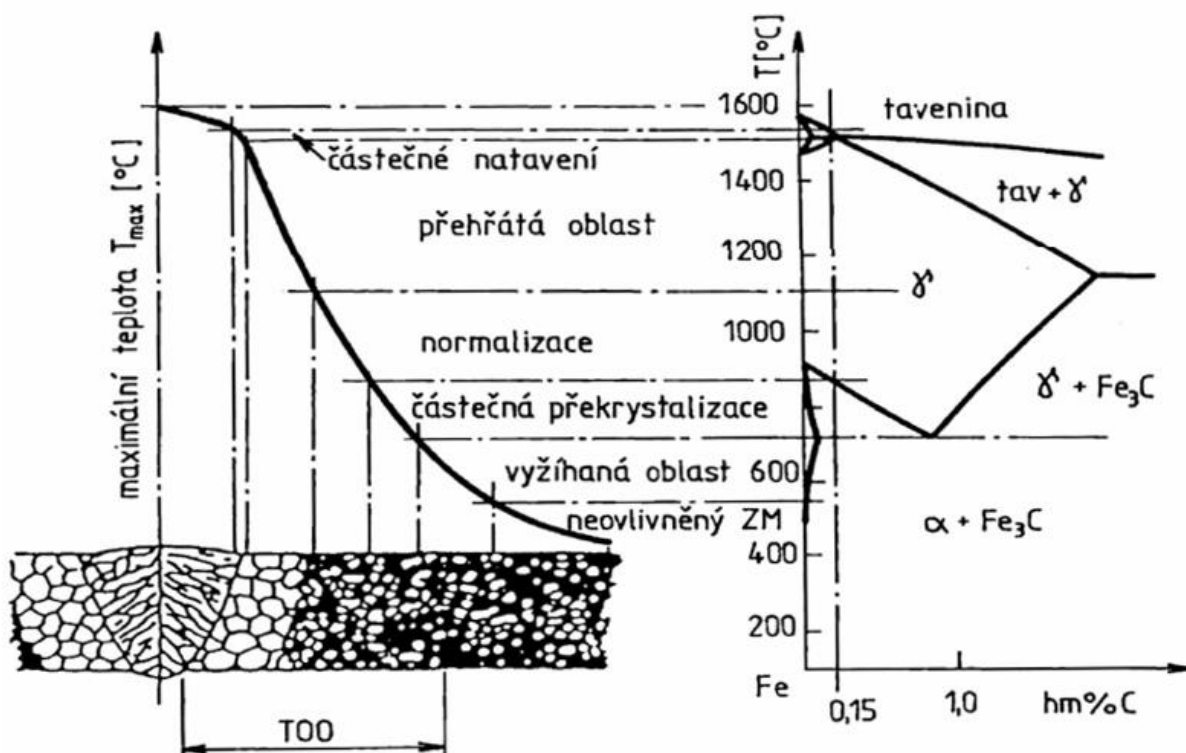
V následujících podkapitolách bude rozebrána svařitelnost s ohledem na zvolený materiál a technologii svařování. (Aby bylo možné těmito dvěma aspekty v souvislosti porozumět, je nezbytné se zevrubně seznámit s metalurgickými pochody a možnými strukturními útvary, se kterými se lze v rámci tavného svařování setkat.) Vliv konstrukce pro tuto chvíli opomeneme, neboť její posuzování není z hlediska uskutečněného experimentu opodstatněné. Nicméně v reálných aplikacích nelze tuto opomíjet, neboť i ona může mít na kvalitu zhotovených svařenců zásadní vliv.

### 2.6.1 Metalurgické pochody při svařování [10], [11], [21], [22]

Při tavném svařování je nutno vnést do místa svaru tolik tepla, kolik je ho zapotřebí k dosažení teploty tavení svařovaných materiálů, případně i přídavného materiálu – je-li tento použit, (se zohledněním tepelných ztrát), což vede natavení svarových ploch a zhotovení svarového spoje. Vzhledem k tomu, že je tohoto v daném okamžiku dosahováno jen ve velmi malé oblasti (vysoká koncentrace tepla na malou plochu), zavádí se v rámci teoretického popisu procesu svařování pojem teplotního pole, které popisuje šíření tepla z místa svaru. Toto zaujímá svou důležitost především v případě svařování kovů a slitin (mezi něž patří i oceli), u nichž dochází se změnou teploty k polymorfním přeměnám (tj. ke změnám krystalické mřížky a tím i struktury materiálu). Tyto změny se přitom neodehrávají pouze ve svarovém kovu, nýbrž i v blízkém okolí svaru, jež je tímto teplotním polem ovlivněno a kterou souhrnně nazýváme teplotně ovlivněnou oblastí (dále jen TOO). Velikost a struktura této tepelně ovlivněné oblasti vzniklé v rámci svařování (tedy při tzv. teplotním cyklu) je jedním z určujících faktorů pro výsledné mechanické vlastnosti zhotoveného svarového spoje. Při bližším zkoumání můžeme svar i TOO z hlediska struktury materiálu rozdělit do několika rozlišitelných pásem:

*Pozn.: Uvedený obrázek obecně platí pro nižší rychlosti ochlazování, kde dochází rovnovážným přeměnám. V případě rychlého přechlazení (které v rámci laserového svařování nastává) zpravidla dochází zakalení a tvorbě nerovnovážných struktur v mnohých případech odlišných od následujícího obrázku.*

- Svarový kov – jedná se o litou strukturu, která vznikla ochlazením materiálu z teploty vyšší, než je teplota liquidu (tavení)
- Oblast částečného natavení – pásmo, kde došlo pouze k částečnému natavení dosažením teplot mezi teplotou liquidu (tavení) a solidu (tuhnutí)
- Přehřátá oblast – hrubozrnná oblast, která vzniká vlivem intenzivního působícího tepla, vykazuje nejhorší mechanické vlastnosti
- Oblast normalizace – pásmo s jemnozrnnou strukturou vzniknuvší ochlazováním z teploty  $A_{c3}$  (v podstatě se jedná o normalizační žíhání s překrystalizací)
- Oblast částečné překrystalizace (též nazývána interkritickou) – zde došlo vlivem ohřevu a následného ochlazení z teplot mezi  $A_{c3}$  a  $A_{c1}$  pouze k neúplné polymorfní přeměně
- Oblast vyžíhaného materiálu (též oblast subkritická), případně neovlivněný základní materiál



Obr. 23 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje [10], [11], [21], [22]

Chceme-li dále posuzovat kvalitu laserem zhotovených svarů, případně porozumět příčinám možných svarových vad, měli bychom něco vědět o procesech, které ve svaru v rámci tuhnutí roztaveného kovu probíhají (- přičemž se nejedná pouze o tuhnutí samotné, nýbrž i o tepelné ovlivnění v TOO).

Laserové svařování je specifické tím, že při něm dochází k fokusaci laserového svazku s vysokou plošnou hustotou výkonu, který ve svařovaném materiálu způsobí rychlý lokální ohřev, přičemž se nestíhají uplatňovat mechanismy odvodu tepla vedením a sáláním. Dojde-li následně k přesunu zdroje energie (tj. fokusovaného svazku) mimo sledované místo, může nastat rychlé ochlazování doprovázené tvorbou nerovnovážných zakalených struktur, které by za pozvolného ochlazování nevznikly. Rychlost ochlazování (tj. odvodu tepla) obecně roste s objemem materiálu, jež místo svaru obklopuje (- tedy s rostoucí tloušťkou svařovaných materiálů). Důležitými parametry, jimiž je rychlost svařování determinována, jsou velikost teplotního gradientu (tj. teplotní spád), tepelná vodivost svařovaných materiálů a okolního prostředí. Rychlost ochlazování bývá nejčastěji charakterizována časem  $t_{8/5}$ , což je doba, za

kteřou dojde v daném místě k ochlazení z teploty 800°C na teplotu 500°C. Právě v tomto rozmezí se projevuje polymorfie ocelí – tzn. dochází zde k překrystalisaci a důležitým strukturním přeměnám, jež mají vliv na výsledné mechanické vlastnosti svarových spojů. (Nežádka se rovněž sleduje čas  $t_{3/1}$  – tj. doba ochlazení z teploty 300°C na teplotu 100°C, která má nemalý vliv na difuzi vodíku ze svarového spoje.) Z hodnot ochlazovacích rychlostí lze zkonstruovat tzv. diagram anizotermického rozpadu austenitu (dále jen ARA diagram – obr. 26 v podkapitole 2.6.2), který slouží k predikci strukturního uspořádání svaru a tepelně ovlivněné oblasti při daných rychlostech ochlazování. Na polohu křivek v ARA diagramu má největší vliv chemické složení dané oceli, neboť některé prvky zvyšují sklon materiálu k zakalení (- tj. snižuje se kritická rychlost ochlazování), což se v ARA diagramu promítne posunem jeho křivek směrem doprava.

Chceme-li v rámci laserového svařování (ale i jiných technologií) docílit nižších rychlostí ochlazování (tedy zpomalit odvod tepla ze svaru a TOO) a tím dosáhnout houževnatějších struktur, je nezbytné spolu s teplem ze svařovacího zdroje dodávat teplo přídatné ze zdroje externího – tj. použít předehřev, případně dohřev, kterými se sníží teplotní gradient. Tato problematika bude detailněji rozebrána v podkapitole pojednávající o technologické svařitelnosti, kde bude proces předehřevu a dohřevu kvantitativně popsán. Zde se totiž jedná o volbu svařovacích parametrů, nikoli o kvalitativní popis metalurgických pochodů. (Pro komplexnější seznámení se s touto problematikou viz normu ČSN EN 1011).

## 2.6.2 Materiálová svařitelnost nízkolegovaných ocelí [1], [3], [13], [23], [24], [39], [41]

Jak již bylo řečeno, materiálová svařitelnost je dána především chemickým složením, které je zpravidla vyjadřováno hmotnostním procentuálním zastoupením v daném materiálu. V rámci posuzování materiálové svařitelnosti se nejčastěji vychází z hodnoty tzv. uhlíkového ekvivalentu, který zohledňuje podíl legujících prvků s různou váhou dle následujících vztahů:

- Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu CE (též CEV) feritických ocelí (nelegovaných či nízkolegovaných) je normou ČSN EN 1011-2 doporučována tato rovnice:

$$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo+Cr+V)}{5} + \frac{(Ni+Cu)}{15} [hm. \ %] \quad (2.1)$$

- Rovnici je možno použít pro rozsah chemického složení při těchto hmotnostních procentuálních podílech legujících prvků: C (0,05 až 0,25 hm. %), Si (max. 0,80 hm. %), Mn (max. hm. 1,70 %), Cr (max. 0,90 hm. %), Cu (max. 1,00 hm. %), Ni (max. 2,50 hm. %), Mo (max. 0,75 hm. %), V (max. 0,20 hm. %).

- Tento uhlíkový ekvivalent nemusí být vhodný pro oceli obsahující bór.

- Pro výpočet uhlíkového ekvivalentu CET ocelí skupin 1 až 4 dle normy CR ISO 15608 (oceli jsou zde rozděleny především s ohledem na zaručenou mez kluzu a chemické složení) doporučuje norma ČSN EN 1011-2 tento vztah:

$$CET = C + \frac{(Mn+Mo)}{10} + \frac{(Cr+Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} [hm. \ %] \quad (2.2)$$

- Rovnici lze použít v případě, že se obsah legujících prvků pohybuje z hlediska hmotnostně procentuálního zastoupení v těchto rozsazích: C (0,05 až 0,25 hm. %), S (max. 0,80 hm. %), Mn (0,50 až 1,90 hm. %), Cr (max. 1,50 hm. %), Cu (max. 0,70 hm. %), Ni (max. 2,50 hm. %), Mo (max. 0,75 hm. %), Ti (max. 0,12 hm. %), V (max. 0,18 hm. %), B (max. 0,005 hm. %), Nb (max. 0,06 hm. %)

Hodnota uhlíkového ekvivalentu vypovídá o sklonu daného materiálu k zakalení ve svarovém kovu, resp. v tepelně ovlivněné oblasti (dále jen TOO) svarového spoje a o možné

náchylnosti svarových spojů ke vzniku trhlin za studena. Vznik těchto trhlin je ovlivňován také obsahem difuzního vodíku ve svaru a tloušťkou svařovaných dílů, resp. tuhostí svařenců a množstvím tepla vneseného do svarového spoje při svařování na jednotku jeho délky.

Jedním ze základních technologických opatření, jímž se riziko vzniku trhlin za studena eliminuje, je již zmíněný předehřev svarových spojů, kterým se sníží rychlost ochlazování, čímž je zabráněno zakalení svarového kovu a TOO svarového spoje. Jinými slovy je dosaženo nižšího teplotního gradientu (spádu) ve svaru, což se rovněž pozitivně odrazí ve snížení zbytkových pnutí.

Znalost samotné hodnoty uhlíkového ekvivalentu nám však příliš neřekne. Důvodem, proč se uhlíkový ekvivalent počítá je stanovení teploty předehřevu. Pro úplnost je nutno dodat, že teplotu předehřevu lze určit i experimentálně – např. zkouškou praskavosti Tekken, CTS testem apod. Vzhledem k náročnosti experimentu, jeho finanční nákladnosti a použitelnosti výsledků omezené na danou testovanou konfiguraci se jeví jako výhodnější stanovení teploty předehřevu výpočtem na základě empirický vzorců a diagramů zohledňujících tloušťky materiálů, tepelný příkon, zmíněný uhlíkový ekvivalent a stupně obsahu vodíku. Jejich vhodnost se může přirozeně lišit v závislosti na chemickém složení a použité metodě svařování.

Níže je uvedeno několik způsobů, kterými lze teplotu předehřevu bez použití experimentu stanovit: *(Důležitá poznámka!! – Uvedené výpočty jsou koncipovány pro metody obloukového svařování a nejsou tedy plně aplikovatelné pro svařování laserem, v rámci něhož je rychlost ochlazování svaru mnohonásobně vyšší. Nicméně vzhledem k tomu, že oblast svařování laserem je krajinou dosti neprobádanou, nezbyvá než se opírat o poznatky, jež máme prozatím k dispozici.)*

a) Výpočet teploty předehřevu podle Sefariána

vhodný pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,1 hm. %

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 25} \quad [^{\circ}\text{C}] \quad (2.3)$$

kde  $T_p$  – teplota předehřevu [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$$C_p = C_c + C_s \quad [-] \quad (2.4)$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (\text{Mn} + \text{Cr}) + 20 \cdot \text{Ni} + 28 \cdot \text{Mo}}{360} \quad [-] \quad (2.5)$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c \quad [-] \quad (2.6)$$

kde  $t$  – tloušťka plechu [mm]

b) Výpočet teploty předehřevu dle ČSN EN 1011 – 2 B

určený pro obloukové metody svařování nízkolegovaných vysokopevnostních ocelí:

- dílčí hodnota teploty předehřevu zohledňující uhlíkový ekvivalent:

$$T_{pCET} = 750 \cdot CET - 150 \quad [-] \quad (2.7)$$

- dílčí hodnota teploty předehřevu zohledňující tloušťku svařovaného materiálu:

$$T_{pd} = 160 \cdot \tanh\left(\frac{t}{35}\right) - 110 \quad [-] \quad (2.8)$$

- dílčí hodnota teploty předehřevu zohledňující obsah difuzního vodíku:

$$T_{pHD} = 62 \cdot \text{HD}^{0,35} - 100 \quad [-] \quad (2.9)$$

- dílčí hodnota teploty předehřevu zohledňující tepelný příkon  $Q$  [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]:

$$T_{pQ} = (53 \cdot CET - 32) \cdot Q - 53 \cdot CET + 32 \quad [-] \quad (2.10)$$

- celková hodnota předehřevu  $T_p$  vycházejícího z uhlíkového ekvivalentu CET je součtem výše uvedených dílčích teplot:

$$T_p = T_{pCET} + T_{pd} + T_{pHD} + T_{pQ} \quad [-] \quad (2.11)$$



Tento výpočtový algoritmus platí pro svařování ocelí splňujících následující parametry:

- mez kluzu  $Re < 1000 \text{ MPa}$
- uhlíkový ekvivalent  $CET = 0,2 \div 0,5 \text{ hm. \%}$
- tloušťka svařovaných materiálů  $t = 10 \div 90 \text{ mm}$
- vnesené teplo  $Q = 0,5 \div 4,0 \text{ kJ}\cdot\text{mm}^{-1}$
- obsah difuzního vodíku  $HD = 1 \div 20 \text{ ml/100 g}$

c) Výpočet teploty předehřevu dle ČSN EN 1011-2 A

Tento způsob stanovení teploty předehřevu, vzešlý převážně (nikoli však výhradně) z rozsáhlých zkušeností s uhlíko-manganovými ocelmi, svou oblastí použití pokrývá oblast nelegovaných, jemnozrnných a nízkolegovaných ocelí. Jelikož vychází z výpočtu uhlíkového ekvivalentu CE dle vztahu 2.1, je rozsah chemického složení dané oceli uváděný v hmotnostních procentech legujících prvků dán rozsahem uvedeným v rámci vztahu pro tento uhlíkový ekvivalent (viz výše), který by se měl prohybovat v rozsahu  $CE = 0,3$  až  $0,7$ . V případě svařování různých ocelí by měla být použita vyšší hodnota uhlíkového ekvivalentu.

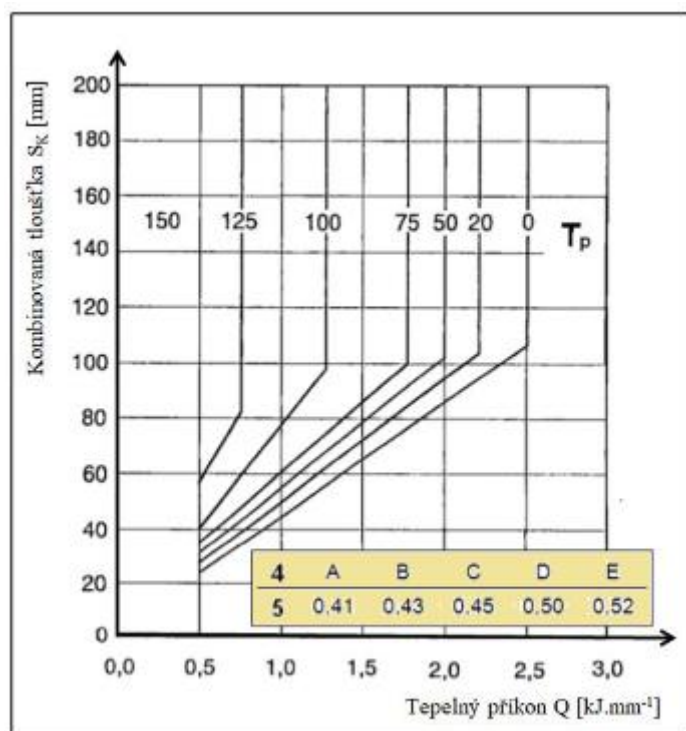
Tab. 2 Určení stupně obsahu difuzního vodíku [39]

*Obsah difuzního vodíku ml/100 g svařového kovu	Stupeň obsahu difuzního vodíku	Maximální kombinovaná tloušťka			
		CE $\approx 0,49$		CE $\approx 0,43$	
		Tepelný příkon 1,0 kJ/mm	Tepelný příkon 2,0 kJ/mm	Tepelný příkon 1,0 kJ/mm	Tepelný příkon 2,0 kJ/mm
		mm	mm	mm	mm
> 15	A	25	50	40	80
$10 \leq 15$	B	30	55	50	90
$5 \leq 10$	C	35	65	60	100
$3 \leq 5$	D	50	100	100	100
$\leq 3$	E	60	100	100	100
*Měřeno v souladu s ISO 3690.					

Pro zodpovědné stanovení teploty předehřevu je nutné znát obsah difuzního vodíku zejména v rámci přídavného materiálu (tabulka 2 z uvedené normy je použitelná pro všechny druhy obloukového svařování). Tyto hodnoty by měly být dány výrobcem s ohledem na dosavadní zkušenosti (mohou však být i nezávisle určeny) v souvislosti s tím, v jakém prostředí byl tento materiál uchováván. Danému obsahu difuzního vodíku se na základě tabulky 2 přiřadí příslušný stupeň, přičemž je obecně požadováno, aby tento byl co nejnižší. (Tabulka 2 dále uvádí, jaké maximální kombinované tloušťky lze při daném obsahu difuzního vodíku lze svařovat bez použití předehřevu za standardních podmínek).



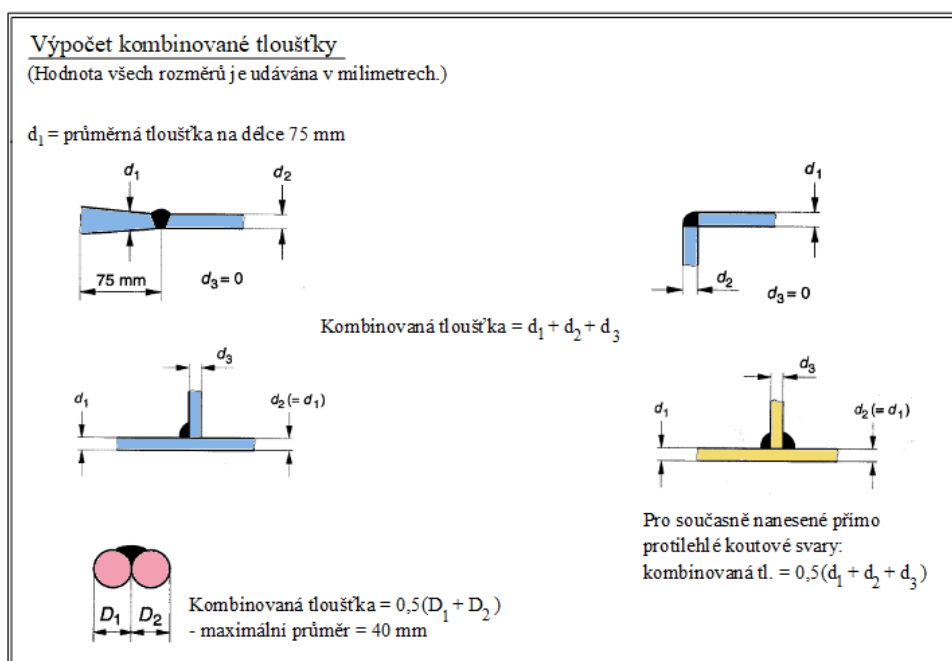
Následně na základě stanovení obsahu difuzního vodíku přiřadíme tomuto materiálu příslušné písmeno (A až E) a přesvědčíme se, zdali spočtený uhlíkový ekvivalent nepřesahuje hodnotu uvedenou pro příslušné písmeno. Pokud ano, není tento diagram v rámci daného materiálu pro odečet teploty předehřevu vhodný. Nepřekročí-li uhlíkový ekvivalent předepsanou hodnotu, odečteme v závislosti na tepelném příkonu (vypočteného dle vzorce 2.13)  $[\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}]$  a kombinované tloušťce (spočtené dle návodu níže)  $[\text{mm}]$  požadovanou teplotu předehřevu  $T_p$   $[\text{°C}]$ .



Obr. 24 Stanovení teploty předehřevu [39]

Výpočet kombinované tloušťky:

Kombinovaná tloušťka, vyjadřující množství okolního materiálu odvádějící teplo, by měla být určena jako součet tlouštěk základního materiálu zprůměrovaný na vzdálenosti 75 mm od linie svaru (- viz obr. 25). Používá se pro posouzení odvodu tepla za účelem určení rychlosti ochlazování. Hodnota kombinované tloušťky přirozeně závisí na geometrii svaru, což v praxi znamená, že např. u koutového svaru bude pro stejnou tloušťku základního materiálu teplota předehřevu vyšší než u svaru tupého.



Obr. 25 Schématický návod pro výpočet kombinované tloušťky [39]

d) Odečtení teploty předehřevu z katalogového listu SSAB

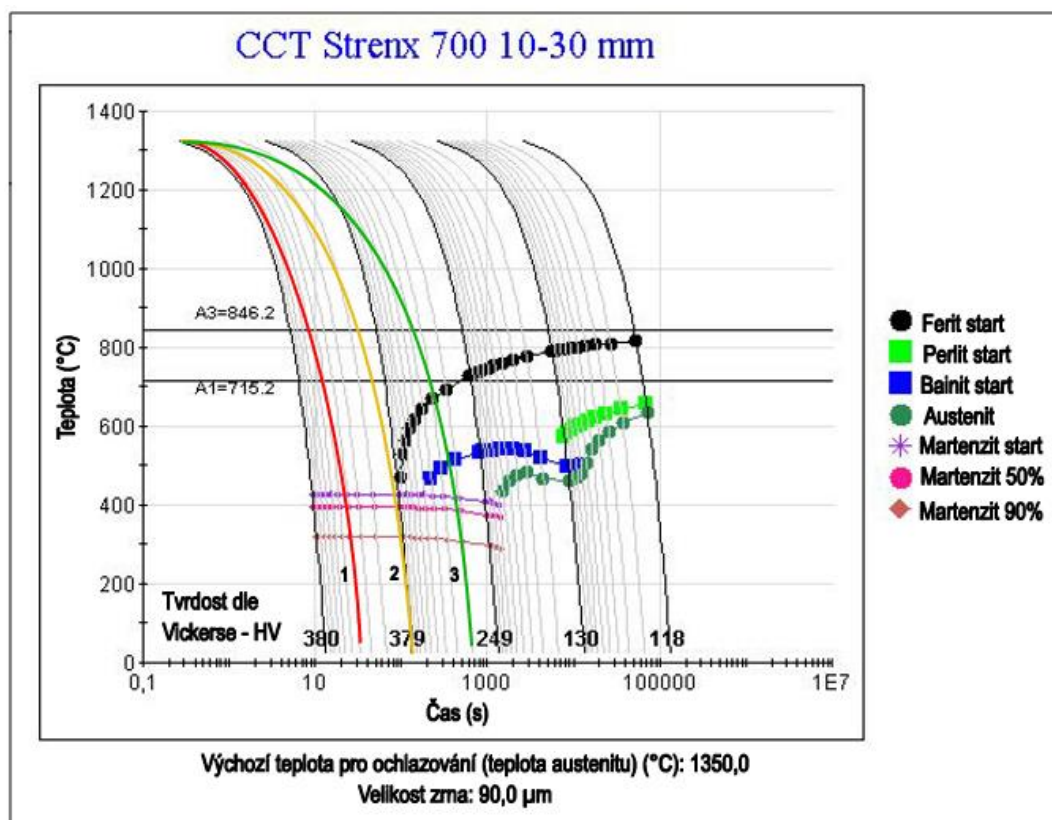
V rámci produkce nízkolegovaných jemnozrnných ocelí vydává jejich výrobce příručky, jež mají spíše charakter katalogu nikoliv normy a údaje zde uvedené nemohou být pro technologa závazné. Nicméně cílem producenta příslušného materiálu je spokojenost zákazníka, a proto se nechá předpokládat, že údaje v těchto katalozích budou mít reálný podklad v podobě mnohaletých zkušeností s danými materiály. Na obr. 33 v podkapitole 3.1.1 je znázorněna tabulka k oceli Strenx 700 (dříve Domex 700 MC), kde je předehřev uvažován až od tloušťky 30 mm.

e) Odhad užitím ARA diagramu

Při znalosti rychlostí ochlazování v rámci teplotních cyklů (tj. znalosti  $t_{8/5}$ ) je možné odhadnout výslednou mikrostrukturu a tím i mechanické vlastnosti v pozorovaných místech svaru či TOO. Potřebám svářecích technologů však více vyhovují diagramy ARA „in situ“ mající na vodorovné ose namísto času přímo parametr  $t_{8/5}$ , což ve výsledku vede k věcnému odhadu, zdali je či není nutné užít předehřevu a v případě, že ano pak i k přibližnému stanovení teploty předehřevu.

Na obdobném principu fungují softwary sloužící k simulaci průběhu svařovacích procesů – mezi nejznámější patří SYSWELD, Gleeble aj.

- Křivka 1 znázorňuje ochlazování nadkritickou rychlostí, při kterém dochází výhradně k přeměně austenitu na martenzit
- Křivka 2 představuje ochlazování kritickou rychlostí, jež stále postačuje k úplné transformaci austenitu na martenzit
- Křivka 3 je znázorněním ochlazování podkritickou rychlostí, při němž vznikají houževnatější struktury (bainit, popř. ferit či perlit).



Obr. 26 ARA diagram pro ocel Strenx 700 (dle dřívějšího označení Domex 700)

V souvislosti s ARA diagramem není od věci si uvědomit, že je z něj možné přibližně odečíst i tvrdost materiálu dle Vickerse po ochlazení. V odborné literatuře setkat s empirickými vzorci počítajících tvrdost pod svarovou housenkou, vycházejících z chemického složení (- přesněji řečeno z faktu, že dané prvky mají různou měrou vliv na kalitelnost a prokalitelnost ocelí) – jedním z nich je tento:

$$HV = 90 + 1050.C + 47.Si + 75.Mn + 30.Ni + 31.Cr \quad (2.12)$$

Porovnáním takto stanovené tvrdosti s tvrdostmi uvedenými v ARA diagramu si můžeme učinit přibližnou představu o strukturním složení, jehož může být v rámci procesu dosaženo.

Výpočtem uhlíkového ekvivalentu a výběrem některým experimentálním či početním postupem lze zjistit, zdali je svařovaný materiál v rámci svařování přehřívát, případně na jakou teplotu. Abychom byli schopni dodržet rychlost ochlazování (tj. aby se doba  $t_{8/5}$  pohybovala v požadovaných mezích), je však nezbytné stanovit, kolik tepla je nutno do místa svaru vnést, a to i s ohledem na tepelné ztráty. Vzhledem k tomu, že velikost vneseného tepla již úzce souvisí s parametry volenými pro daný proces svařování, bude tato problematika podrobněji rozebrána v následující podkapitole.

### 2.6.3 Technologická svařitelnost v rámci svařování laserem [1], [3], [4], [13], [41]

Pod pojem technologická svařitelnost dané metody lze obecně zahrnout výpočet množství vneseného tepla do svarového spoje, stanovení parametrů svařování, možnosti přípravy a očištění svarových ploch, volba použití přídavných materiálů, poloha svaru, použití přehřevu a dohřevu v rámci svařovacího procesu, stanovení teploty interpass (tj. mezioperační teploty u vícevrstevných svarů), návrh tepelného zpracování – např. žíhání ke snížení pnutí, popouštění apod. S některými těmito aspekty, jež mají v souvislosti se svařováním laserem (s ohledem na zamýšlený experiment) své opodstatnění a důležitost se v následujících odstavcích seznámíme.

- Parametry volené v procesu svařování laserem

Vzhledem k tomu, že se laserové svařování uskutečňuje v drtivé většině bez přídavného materiálu, vstupují do hry z hlediska technologické svařitelnosti zejména tyto parametry svařování:

- Výkon laseru
- Rychlost svařování
- Režim svařování
  - pulzní / kontinuální
  - indukční / penetrační
- Použití přehřevu / dohřevu
  - volba svařovacího proudu, napětí v rámci přehřevu / dohřevu
  - vzdálenost zdroje přídavného tepla od laserového svazku
- Volba ochranného plynu

- Vnesené teplo (tepelný příkon)

V rámci svařování laserem dochází vlivem působení záření laserového svazku k vývinu tepla v místě budoucího svaru, které způsobí natavení svarových ploch a tím zhotovení svaru. Toto teplo je označováno jako vnesené teplo (nebo též jako tzv. tepelný příkon) – je definováno jako množství tepla dodaného do svaru vztažené na jednotku délky a vyjádřeno následujícím vztahem:

$$Q = k \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = k \cdot \frac{P \cdot 60}{v \cdot 1000} \quad [\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}] \quad (2.13)$$

kde: Q – tepelný příkon [ $\text{kJ} \cdot \text{mm}^{-1}$ ]

k – koeficient účinnosti postupu svařování [-]

U – svařovací napětí zdroje [V]

I – svařovací proud [A]

v – rychlost svařování [ $\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$ ]

P – výkon svařovacího zdroje [W]

Obecně platí, že podaří-li se omezit množství vneseného tepla, bude tím dosaženo nižších deformací, případně zbytkových napětí a užší tepelně ovlivněné oblasti. Vedle procesu vnášení tepla však vlivem teplotní vodivosti dochází i k odvodu tepla do okolního materiálu. Kvantifikace vneseného tepla je tedy důležitá z toho hlediska, že velikost tohoto tepla ovlivňuje rychlost ochlazování vzniklého svarového spoje, resp. tepelně ovlivněné oblasti a tím i výsledné mechanické vlastnosti svarového spoje.

- Předehřev

Při svařování materiálu větších tloušťek totiž dochází ke zvyšování odvodu tepla a tím pádem ke zvyšování rychlosti ochlazování, což (jak již bylo řečeno) může mít za následek vznik zákalných nerovnovážných struktur. Aby bylo tomuto zamezeno, je nutné volit ocel jiného chemického složení, nebo svařovat s předehřevem, čímž se sníží ochlazovací rychlost (prodlouží se zejména doba  $t_{8/5}$ ).

- Dohřev

Dohřev se pak nejčastěji volí zejména za účelem zamezení vodíkového praskání (tj. křehkosti za studena), což se prakticky činí tak, že se prodlouží doba  $t_{3/1}$ , čímž je umožněna difuze vodíku ze svarového spoje – podrobněji je tato problematika rozebrána v normě ČSN EN 1011-2. Z hlediska laserového svařování je cíl dohřevu stejný jako v případě předehřevu – a sice snížit rychlost ochlazování za účelem prevence tvorby nežádoucích struktur.

- Teplota interpass

Teplota interpass (tedy mezioperační teplota), kterou je nutno sledovat klademe-li více svarových housenek na sebe. Vícenásobné svařování totiž může způsobit, že teplota v rámci svaru vzroste na úroveň, která je pro materiál nepříznivá, neboť klesá jeho pevnost. Toto hrozí zejména v případě krátkých svarů, kde teplota nestihne poklesnout na takovou hodnotu, aby mohla být nanesena další housenka. Teplota interpass bývá obvykle stejná jako teplota předehřevu, nicméně může být předepsána i nižší, přičemž je v následujících svařovacích operacích vnášen vyšší tepelný příkon, než v rámci kořenového svaru.

- Zdroje přídavného tepla

Pro vnesení přídavného tepla (za účelem snížení rychlosti ochlazování) lze využít různých zdrojů, z nichž každý má své přirozené své přednosti i stinné stránky. Vzhledem k tomu, že v rámci kapitoly 1 – Rozboru zadání byla pro zamýšlený experiment vybrána kombinace laserového svařování s ohřevem zprostředkovaným metodou TIG, bude tato v následující podkapitole podrobněji rozebrána za účelem analýzy parametrů, jimiž se je možné svařovací proces a tím i výsledek tohoto procesu ovlivnit.

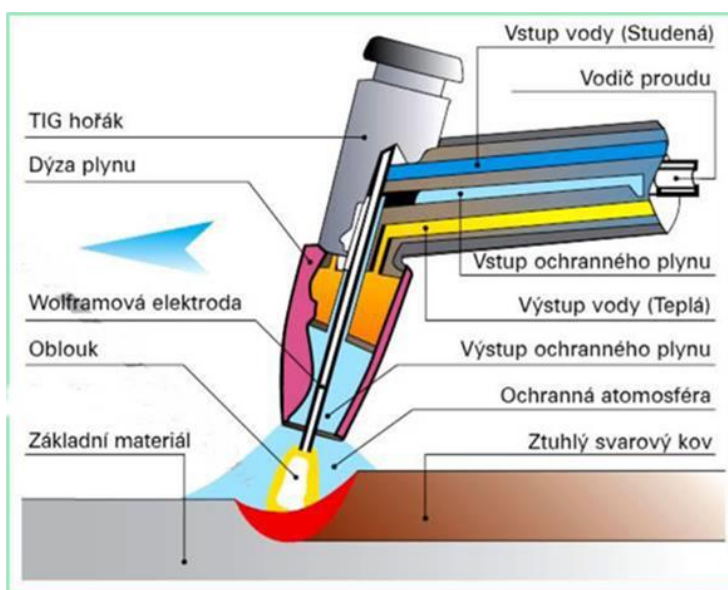
## 2.7 Použití technologie TIG v rámci laserového svařování [1], [2], [5], [14], [15]

Princip obloukového svařování metodou TIG (141) spočívá ve vzniku a hoření elektrického oblouku mezi netavící se wolframovou elektrodou a základním materiálem, přičemž je svarová lázeň elektroda a nejbližší okolí svaru chráněno inertním plynem před účinky okolní atmosféry (především kyslíku a dusíku). Samotná zkratka TIG je odvozena od sousloví „Tungsten Inert Gas“, což přeloženo z anglického jazyka značí svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu. Rovněž se můžeme v souvislosti s touto technologií setkat se zkratkou WIG („Wolfram Inert Gas“), což je označení téhož, pouze pochází z německého jazyka.

Vzhledem k tomu, že středem naší pozornosti je svařování laserem, bude se nám v případě metody TIG jednat pouze o její využití coby přídavného zdroje právě v procesu laserového svařování tepla. To však neznamená, že není zapotřebí principu této metody svařování porozumět – ba naopak, neboť parametry obloukového předehřevu/dohřevu metodou TIG bude v rámci experimentu proměnnou, na které bude záviset kvalita jednotlivých svarů a mimoto bude zvolená technologie předehřevu předmětem technicko-ekonomického zhodnocení. Z těchto důvodů zde bude stručně popsány části svařovacího zařízení a nastíněny možnosti aplikace této metody v technické praxi.

### 2.7.1 Princip technologie TIG [1], [2], [3], [5], [10], [13], [14], [15], [44], [45], [46]

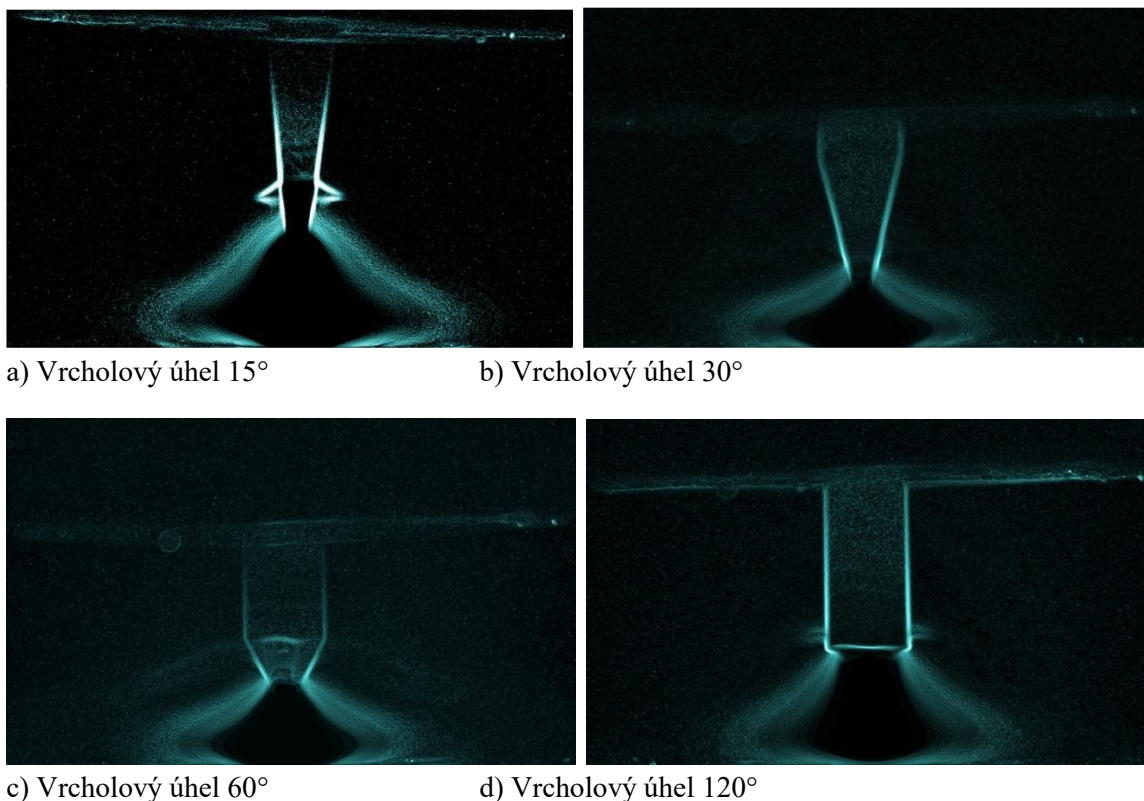
Schématické znázornění metody TIG poskytuje obrázek 27, na němž je zobrazen svařovací hořák s pevně upnutou netavící se wolframovou elektrodou. Vyvinuté teplo od vzniknuvšího oblouku mezi elektrodou a základním materiálem způsobí natavení svařeného materiálu. Jelikož je teplotně zatěžován nejen svařovaný materiál, ale i hořák, je nutno jej chladit – to se činí buď prouděním ochranného plynu (v případě proudů do 150 A) nebo prouděním chladicí kapaliny (při vyšších proudech – až 500 A). Samotná elektroda bývá vyrobena buď z čistého wolframu (99,9%), případně wolframu s příměsemi oxidů thoria, zirkonu, lanthanu nebo ceru, jimiž se zvýší proudová a tepelná zatížitelnost, a které rovněž umožňují snazší zapálení oblouku, jenž má v procesu svařování vyšší stabilitu; v neposlední řadě tyto oxidy prodlužují životnost elektrod.



Obr. 27 Svařování metodou TIG [1], [2], [15], [35]



V souvislosti s elektrodami zařízení TIG je záhodno se seznámit se skutečností, že tvar elektrického oblouku je výraznou měrou závislý na jejich geometrii – tj. zejména jejich vrcholovém úhlu – viz obr. 28. Je třeba si toto uvědomit z toho důvodu, že tvar oblouku může mít v interakci s laserovým svazkem vliv na vlastnosti zhotovených svarů.



Obr. 28 Tvar elektrického oblouku TIG v závislosti na vrcholovém úhlu svařovací elektrody [25]

V rámci praktického používání wolframových elektrod obecně platí, že se wolframová elektroda během svařování nesmí dotknout základního materiálu, neboť tak může dojít k odpadnutí částec wolframové elektrody do tavné lázně a tím k vytvoření kovových vměstků, jež jsou příčinou necelistvosti a mohou způsobit znehodnocení svaru. K tomuto však nemusí dojít pouhým vznikem kovových vměstků, nýbrž i prostou oxidací. Aby k ní nedošlo, používá v rámci svařování metodou TIG ochranných plynů, čímž je dosaženo čistoty svaru a tím i jeho mechanických vlastností (pevnosti a houževnatosti). Z těch nejpoužívanějších ochranných plynů jmenujme tyto:

- Argon – v ochranné atmosféře argonu lze svařovat všechny svařitelné materiály. Jako ochranný plyn tento dobře zapaluje oblouk a v rámci svařování metodou TIG je pro něj charakteristická velká čistota (99,7% - 99,999%) a efektivita použití.
- Helium – jeho využití coby ochranného plynu není příliš efektivní, což je v praxi kompenzováno vyšším průtokem. Ve srovnání s argonem špatně zapaluje oblouk – napětí potřebné pro zapálení oblouku může dosahovat až 100 V. Z tohoto důvodu se nezřídka používá speciálně pro účely zapálení oblouku jiný ochranný plyn – např. zmiňovaný argon. Vzhledem k tomu, že se oblouk v ochranné atmosféře helia stává při větší délce nestabilním, užívá se helium nejčastěji pro mechanizovaný proces svařování. Helium jako plyn se vyznačuje vysokou tepelnou vodivostí, čehož se s úspěchem využívá pro svařování kovů, jež mají rovněž velkou tepelnou vodivost – např. hliník, měď aj., případně pro svařování materiálů o velkých tloušťkách.

- Kombinace Ar + He – spojuje výhody obou výše zmíněných ochranných plynů – to ve výsledku umožňuje zhotovit svary s hlubokým průvarem, a to vysokou rychlostí svařování.
- Varigon (= obchodní označení pro směs Ar + H<sub>2</sub>, případně směs Ar + N<sub>2</sub>) – v praxi se lze setkat i s ochrannými plyny tvořenými z větší části argonem, který je ovšem doplněn o příměsi – buď vodíku nebo dusíku. Ochranné plyny využívají redukční vlastnosti vodíku, což s sebou přináší větší čistotu svarů a možnost rychlejšího svařování. Své využití nacházejí především pro svařování vysoce-legovaných austenitických a austenitoferitických CrNi ocelí, příp. niklu a jeho slitin. Nehodí se však pro svařování martenzitických CrNi ocelí, kde může vlivem vodíku docházet k praskání za studena. Pro svařování ocelí duplexních, případně kovů citlivých na čistotu ochranného plynu (titan, tantal, zirkon aj.) se pak nezřídka používá směs argonu a dusíku, kterou dosáhneme vyvážené mikrostruktury svaru a docílíme zvýšení korozní odolnosti.

Ochranný plyn je vháněn tryskou obklopující wolframovou elektrodou, přičemž jeho průtok je možno hořákem regulovat. To je důležité už jen s ohledem na skutečnost, že se požadovaný průtok se liší v závislosti na použitém ochranném plynu. Dále nastavení průtoku závisí na druhu svařovaného materiálu, typu spoje a svařovací poloze, velikosti svařovacího proudu a plynové trysky hořáku.

Metoda TIG umožňuje svařovat jak střídavým, tak stejnosměrným proudem. Střídavého se využívá především pro svařování hliníku, hořčíku a jeho slitin, stejnosměrného pak pro svařování vysokolegovaných ocelí, mědi, niklu, titanu atd. Použitím stejnosměrného proudu je dosaženo menšího tepelného ovlivnění základního materiálu a zároveň větší hloubky protavení než při použití střídavého proudu. Podobně jako v případě laserového svařování, umožňují moderní tranzistorové zdroje plynule nastavovat pulzaci svařovacího proudu, čímž definovaně určují jeho časový průběh a tím i přenos kovu uvnitř oblouku. Spolu s využitím mikroprocesorů lze takto docílit optimálního řízení celého svařovacího procesu. Díky pulzaci svařovacího proudu totiž nevzniká zbytečně velká tavná lázeň, což ve výsledku plyne menší tepelné ovlivněná oblast a tím i menší deformace.

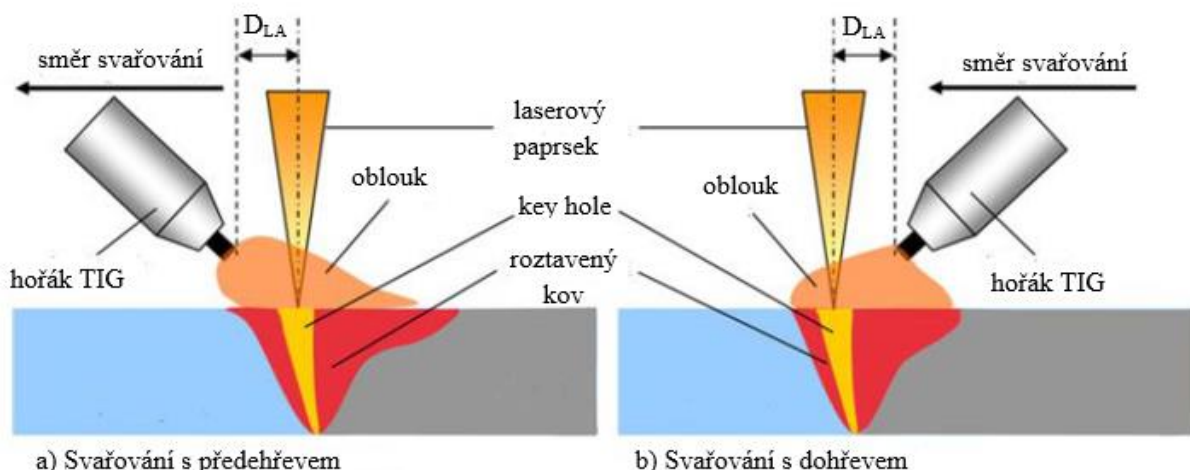
Přestože zdrojem pro metodu TIG (tedy zařízením, které dodává do uzavřeného svařovacího obvodu elektrický proud, jenž je svými hodnotami proudu a napětí pro tuto metodu vhodný) mohou být různá zařízení (svařovací dynama, svařovací transformátory) za účelem předehřevu pro laserové svařování připadají v úvahu invertorové svařovací zdroje – obr. 29 (což jsou moderní provedení svařovacích usměrňovačů). Lze tak usuzovat s ohledem na jejich spolehlivost, nízkou hmotnost a vynikající svařovací charakteristiky. Tato zařízení jsou již zpravidla schopna svařovat v pulzním režimu, pomocí procesoru udržovat konstantní hodnoty předvoleného proudu, sledovat provozní teploty, plynule nastavovat svařovací proud; mimoto jsou vybaveny displejem digitálním zobrazování nastavených parametrů, bezpečným vysokofrekvenčním zapalováním oblouku, úhrnem lze říci, že jsou lehce ovladatelné a energeticky úsporné.



Obr. 29 Invertorové svařovací zdroje pro metodu TIG [29]

## 2.7.2 Hybridní svařování LASER-TIG [7], [13], [38]

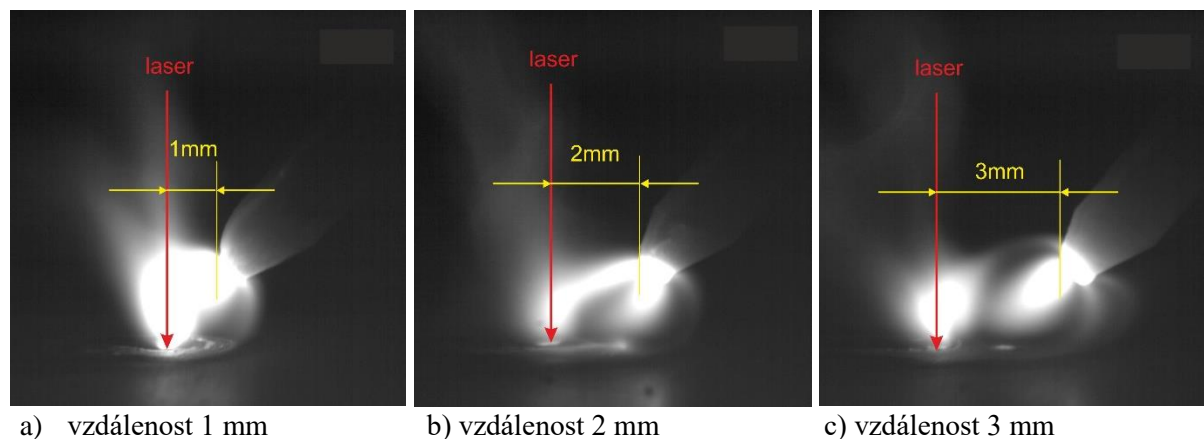
Hybridní svařování laser-TIG spočívá v kombinaci svařování laserovým paprskem a přídavného obloukového předehřevu či dohřevu – viz obr. 30. Na první pohled by se mohlo zdát, že obě uvedené jsou ve své podstatě zaměnitelné a lze jimi dosáhnout totožných výsledků. Nejnovější výzkumy ovšem ukazují, že použití předehřevu (oproti dohřevu) výrazněji napomáhá většímu provaření kořene svaru. O tom, jak je tomu v případě svařování nízkolegovaných jemnozrnných ocelí se přesvědčíme v rámci experimentu – proto tuto otázku ponechme pro zatím otevřenou.



Obr. 30 Hybridní technologie laser-TIG [7]

Mimo nastavení svařovacích parametrů laseru a přídavného obloukového zdroje je jedním z nejdůležitějších kritérií pro kvalitu zhotovených svarů vzdálenost elektrody od laserového svazku (v obrázku 30 značena  $D_{LA}$ ). V souvislosti obloukovým předehřevem v kontextu laserového svařování je třeba si uvědomit, že elektrický oblouk není ničím jiným než ionizovaným plynem tedy plazmou. Stejně tak plazmou je obláček par kovů ionizovaných laserovým zářením nad tzv. keyhole v rámci penetračního režimu (viz podkapitulu 2.4). V procesu svařování s předehřevem pak dochází k interakci těchto dvou – přesněji řečeno hoření oblouku předehřevu hoří tak, jak je to pro něj nejvýhodnější – tedy využívá vzniklého obláčku plazmatu nad keyhole (to je nejvíce zřetelné z obr. 31 b)).

Kromě toho, je-li wolframová elektroda již příliš blízko, může docházet ke spalování elektrody laserovým svazkem, což se negativně odrazí na stabilitě oblouku a může toto být příčinou možných defektů ve zhotoveném svaru.



Obr. 31 Hoření elektrického oblouku v rámci technologie laser – TIG v závislosti na vzdálenosti wolframové elektrody od laserového svazku



## 2.8 Vady svarů zhotovených laserem [1], [2], [3], [13], [14], [30]

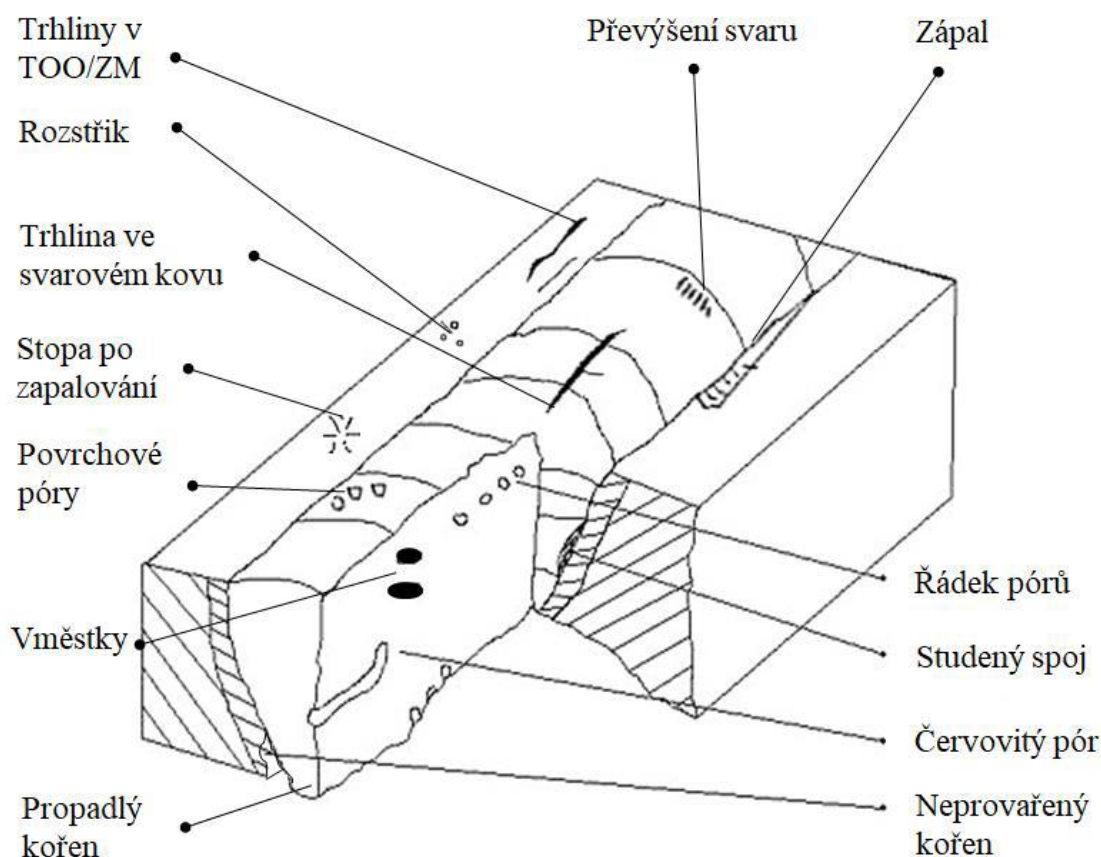
Podobně jako při svařování konvenčními technologiemi, lze se i v rámci svařování laserem dopustit chyb, které mohou mít za následek zhotovení vadných svarů. Za vadu svaru přitom může být považována jakákoli odchylka od vlastností předepsaných technickými normami, technickými podmínkami či smluvním vzorkem, jež může mít negativní vliv mechanické a estetické vlastnosti svarového spoje. Z funkčního hlediska je nejdůležitějším mechanický aspekt, neboť vadné svary mohou být příčinou snížení únosnosti, únavového selhání či křehkého lomu.

Svarové vady přitom mohou být jak povrchové – tj. vizuálně rozpoznatelné (trhliny, neprovařený kořen, pórovitost svaru), tak podpovrchové, které je možné odhalit pouze destruktivními či nedestruktivními zkouškami (studené spoje, vměstky, plynové dutiny, staženiny) – viz obr. 32. Na základě zjištění velikosti, tvaru, četnosti či umístění svarových vad je specifikováno, do jaké míry je jaká vada přípustná či nikoli – v případě nepřípustnosti dané vady je následně rozhodnuto o způsobu opravy svaru či o vyřazení daného svařence. Tato problematika je podrobněji zpracována v normách ČSN EN ISO 6520-1, ČSN EN 5817 a ISO/TS 17845; v následujících odstavcích budou pouze stručně popsány vady, které se vyskytují nejčastěji a jejichž znalost má i v rámci laserového svařování své opodstatnění:

- Póry, plynové dutiny – za jejich tvorbou stojí plyny, které se ve svarové lázni mohou vyskytnout vlivem dezoxidačních procesů ve svarovém kovu, dále vlivem nečistot či působením okolní atmosféry. Při rychlém ochlazování – a tedy rychlé krystalizaci svarového kovu nestihnou tyto plyny uniknout a zůstávají tudíž ve svarovém kovu, což se navenek projeví právě póry a dutinami. Tyto jednak snižují nosnou plochu svaru (zvláště je-li jich více vedle sebe) a jednak mohou působit jako tzv. koncentrátor napětí – tedy mohou být místem, odkud se v případě mechanického namáhání nejsnáze šíří trhlinka. V rámci laserového svařování může k tvorbě plynových dutin dojít vlivem rychlé změny polohy „key hole“, kdy dochází k uzavírání plynových bublin a tím i jejich setrvání uvnitř svarového spoje.
- Vměstky – v případě laserového svařování, které probíhá v drtivé většině bez přídavného materiálu, jsou těmito zejména vměstky oxidické či kovové. Jelikož se vměstky obecně vyznačují ostrými okraji, představují coby koncentrátor napětí značné nebezpečí, a to zejména při cyklickém zatěžování, během kterého může vlivem této svarové vady dojít k únavovému lomu.
- Trhliny za horka – (interkrystalického – tj. mezikrystalického charakteru) – vznikají při vyšších teplotách (800°C až 900°C); jejich výskyt je odvislý od chemického složení základního materiálu – náchylnější bývají oceli s vyšším obsahem síry, popř. oceli s vysokým podílem uhlíku, manganu a dalších legujících prvků.
- Žíhací trhliny – k jejich vzniku dochází vlivem velkých teplotních rozdílů mezi povrchem a jádrem svarového spoje. U běžně používaných ocelí se tyto trhliny tvoří v nízkoteplotním pásmu (při teplotách do 300°C); ocelí obsahující chrom a vanad jsou k těmto trhlinám náchylnější v oblasti vyšších teplot (cca 500°C až 600°C).
- Trhliny za studena – (transkrystalického charakteru) – vznikají vlivem působení difuzního vodíku při teplotách od 100°C do 300°C, vůči němuž jsou zejména svary se zakalenou martenzitickou strukturou velmi citlivé. Jako prevence je doporučováno prodloužení doby ochlazování zhotoveného svaru v uvedeném teplotním intervalu (tj. prodloužení doby  $t_{3/1}$ ).
- Studené spoje – jedná se o závažnou vadu svaru, nedokonalému tavnému spojení svarového kovu a základního materiálu. Nejčastěji bývají důsledkem nesprávného

nastavení svařovacích parametrů (např. volba příliš vysoké rychlosti svařování, nízký svařovací proud apod.).

- Neprůvary – svarové defekty vzniknuvší pouze částečným promísením svarového kovu se základním materiálem. Na vině bývá rovněž vysoká svařovací rychlost, případně špatná příprava svarových úkosů.
- Kořenové vady – může se jednat buď o neprovaření kořene svaru – tedy nespojitost svarového kovu se základním materiálem, která je způsobena nedostatečným natavením svarových ploch v místě kořenu svaru. Toto v důsledku vede ke zeslabení nosného průřezu svaru a vnesení vrubu, který může v rámci cyklického namáhání stát za vznikem únavového lomu.
- Asymetrie svaru – jistá obtížnost laserového svařování spočívá v požadavku dobrého uchycení svařovaných dílů v přípravku a následného optimálního namíření laserového paprsku do místa budoucího svarového spoje. V případě, že se tomuto nepodaří tak úplně dostát, může v lepším případě dojít ke zhotovení asymetrického svaru (viz obrázek 22 v podkapitole 2.5), v horším případě dokonce k nesvaření obou svařovaných dílců.



Obr. 32 Schématický obrázek svarových vad [13], [30]

Tímto byla zevrubně rozebrána technologie svařování laserem, vymezena svařitelnost nízkoalokovaných ocelí, nastíněna použitelnost obloukové metody TIG coby zdroje přídavného tepla pro laserové svařování a konečně rozebrány vady, se kterými se jak v rámci experimentu, tak poté v běžné praxi můžeme setkat. Po teoretickém rozboru se tedy nyní obraťme k praxi a přistupme k experimentální části.

### 3 EXPERIMENT [40], [41], [42], [43]

V této experimentální části bude podrobněji popsán zvolený materiál (v našem případě pevnostní jemnozrná ocel Domex 700 MC), jenž bude následně podroben experimentu. Tato charakteristika bude doprovázena výpočtovou částí, z níž bude možné do jisté míry usoudit, zda lze daný materiál svařovat bez předehřevu – a v případě, že nikoli, bude doporučena teplota předehřevu. Samotný experiment pak bude spočívat ve svařování plechů tloušťky 3 mm z uvedené oceli s využitím obloukového předehřevu/dohřevu metodou TIG při proměnné vzdálenosti wolframové elektrody od laserového svazku. Zhotovené svary budou testovány z hlediska mechanických vlastností – bude provedena tahová zkouška a zkouška tvrdosti podle Vickerse, dále bude provedena vizuální analýza odebraných vzorků (tj. bude posuzována makrostruktura a mikrostruktura svaru z hlediska možných svarových vad).

#### 3.1 Volba materiálu a posouzení svařitelnosti [40], [41], [42], [43]

Pro účely experimentu byl vybrán plech z pevnostní jemnozrné oceli Domex 700 MC o tloušťce 3 mm, jehož chemické složení (tj. zastoupení vybraných prvků v hmotnostních procentech v rámci daného materiálu) je patrné z tabulky 3, případně z Přílohy 1. Jedná se o jemnozrnou nízkolegovanou (mikrolegovanou) ocel, která dosahuje svých pevnostních vlastností nikoliv množstvím legur, nýbrž právě zmíněnou jemnozrností. Této jemnozrnosti je docíleno precizním metalurgickým a tepelným zpracováním, které spočívá ve válcování za tepla v přesně definovaných podmínkách (tj. je stanoveno, za jaké teploty a po jakou dobu je plech válcován), přičemž vlivem mikrolegování této oceli nedochází v průběhu tohoto procesu k růstu austenitického zrna (svou roli zde hraje především titan a niob). Výsledkem je tedy pevnostní ocel s jemnozrnou válcovanou strukturou, jež vykazuje následující mechanické vlastnosti:

- Smluvní mez kluzu  $R_{p0,2} = 772 \text{ MPa}$  (garantováno  $R_{eH} = 700 \text{ MPa}$ )
- Mez pevnosti  $R_m = 798 \text{ MPa}$  (garantováno  $R_m = 750 \text{ až } 950 \text{ MPa}$ )
- Tažnost  $A_5 = 20 \%$  (garantováno pro plechy  $tl \geq 3 \text{ mm}$   $A_{5min} = 12\%$ )
- Nárazová práce
  - při teplotě  $-20^\circ\text{C}$   $40 \text{ J}$
  - při teplotě  $-40^\circ\text{C}$   $27 \text{ J}$

Tab. 3 Chemické složení oceli Domex 700 MC [40], [41], [42]

Chemické složení oceli Domex 700 MC							
Legující prvek	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
Maximální hodnoty [hm%]	0,12	0,10	2,10	0,025	0,010	0,015	
Skutečné hodnoty [hm%]	0,065	0,024	1,880	0,008	0,000 <sub>9</sub>	0,044	0,028
Legující prvek	Ni	Mo	Cu	Nb	V	Ti	B
Maximální hodnoty [hm%]				0,09	0,20	0,15	
Skutečné hodnoty [hm%]	0,023	0,010	0,020	0,050	0,008	0,136	0,000 <sub>2</sub>

Chceme-li svařovat plechy z uvedeného materiálu, je nejprve zapotřebí posoudit jejich svařitelnost – tedy v souladu s tím, co již bylo řečeno, posoudit svařitelnost materiálovou a technologickou (- konstrukční svařitelnost nebude s ohledem na jednoduchost experimentu brána na zřetel).

### 3.1.1 Materiálová svařitelnost jemnozrnné oceli Domex 700 MC [x], [x]

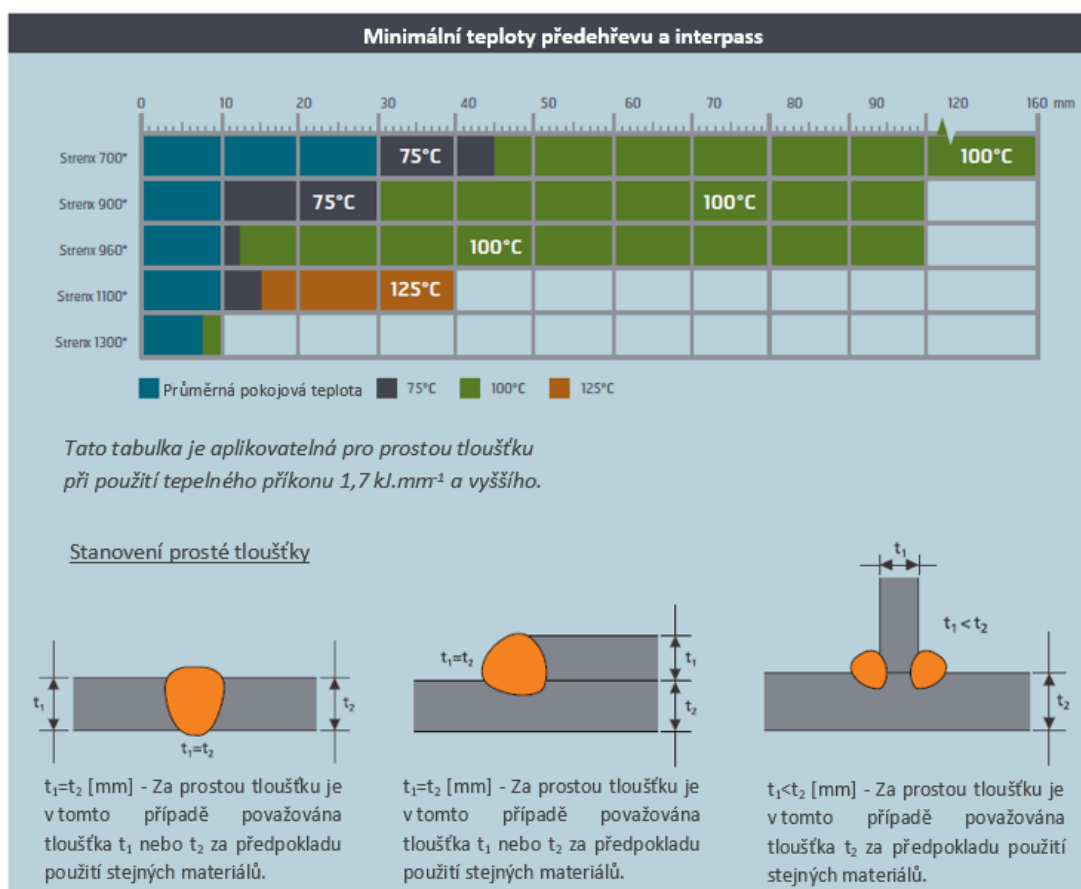
Z hlediska materiálové svařitelnosti je v katalogovém listu ocelí obchodního označení Strenx (dříve Domex) uvedeno, že díky nízkému obsahu uhlíku, fosforu a síry lze tyto oceli snadno svařovat všemi běžnými metodami svařování. Tamtéž se uvádí, že není nutný předehřev, přičemž po zhotovení svaru vznikne v jeho bezprostřední blízkosti úzká tepelně ovlivněná oblast s poněkud nižší tvrdostí. Jsou-li však používány běžné parametry a metody svařování, nehraje tepelně ovlivněná oblast významnější roli. Nicméně pro větší tloušťky je předehřev nezbytný – jeho parametry se pak volí právě s ohledem na danou tloušťku a chemické složení materiálu. Pro stanovení minimální teploty předehřevu a teploty interpass je obecně závazný tzv. uhlíkový ekvivalent, který je vyjádřen zohledněním legujících prvků s různou váhou dle následujících vztahů a početně vyjádřen pro testovaný materiál:

Výpočet uhlíkového ekvivalentu pro ocel Domex 700 MC dle vztahů 2.1 a 2.2:

$$CEV = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Mo + Cr + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} = 0,065 + \frac{1,880}{6} + \frac{(0,010 + 0,028 + 0,008)}{5} + \frac{(0,023 + 0,020)}{15} = 0,39 \text{ hm. \%}$$

$$CET = C + \frac{(Mn + Mo)}{10} + \frac{(Cr + Cu)}{20} + \frac{Ni}{40} = 0,065 + \frac{(1,880 + 0,010)}{10} + \frac{(0,028 + 0,020)}{20} + \frac{0,023}{40} = 0,26 \text{ hm. \%}$$

Obecně lze říci, že s vyšší hodnotou uhlíkového ekvivalentu roste požadavek na vyšší teplotu předehřevu a teplotu interpass. Na obrázku 33 je znázorněna tabulka pro stanovení teploty předehřevu od společnosti SSAB – výrobce ocelí Strenx (Domex). Z ní lze vyčíst, že pro ocel Strenx 700 (odpovídající oceli Domex 700 MC) je předehřev požadován až u plechů tlouštěk 30 mm a vyšších – důležité podotknout, že to obecně platí pro obloukové metody.



Obr. 33 Tabulka pro stanovení teploty předehřevu od společnosti SSAB [40], [41]

Svářecí technolog by se však neměl spokojit s povšechnou informací dobře čitelné tabulky a měl by pátrat i po specifikách, které nejsou z těchto diagramů patrné – to proto, aby mohl na celou problematiku pohlížet komplexně (nikoliv jen povrchně) a mohl se tak vyvarovat případných chyb. – Tak například v témže katalogu je k otázce předehřevu rovněž uvedeno, že pro svařování bez předehřevu je doporučenou podmínkou minimální teplota svařovaných materiálů a okolí minimálně +5 °C – je-li nižší, je požadován předehřev minimálně na teplotu 60 °C, případně zvýšit již předepsanou teplotu o 25 °C. Navýšení již předepsané teploty předehřevu o 25 °C je rovněž vyžadováno tehdy, pohybuje-li se vnesené teplo v rozmezí 1,0 až 1,6 kJ/mm. Teplotu interpass je doporučeno volit stejnou jako je teplota předehřevu. Obě – tedy jak teplota předehřevu, tak teplota interpass by neměly překročit hodnotu 300 °C, neboť by mohlo dojít k degradaci mechanických vlastností ve struktuře svaru. Jsou-li svařovány různé typy ocelí, bere se jako určující minimální teplota předehřevu nejvyšší hodnota této teploty v rámci svařovaných materiálů.

Z hlediska sklonu k vodíkové křehkosti (trhlinám za studena) lze na základě údajů z katalogového listu říci toliko, že riziko vzniku trhlin za studena není v případě ocelí Domex 700 MC vyšší než u běžných svařitelných ocelí. V každém případě je výrobcem doporučeno se v rámci svařování vyhnout vzdušné vlhkosti, zamezit korozi a znečištění svarových ploch. Jako doporučený maximální obsah vodíku ve svarovém kovu je u oceli Domex 700 MC 10 ml/100g.

Vzhledem k tomu, že pro určení teploty předehřevu dle normy ČSN EN 1011-2 B, (vhodné pro obloukové metody) nejsou splněny vstupní parametry, pro které je tento algoritmus použitelný (tloušťka svařovaných materiálů neleží v intervalu  $t = 10$  až 90 mm a vnesené teplo nedosahuje rozmezí  $Q = 0,5$  až 4,0 kJ·mm<sup>-1</sup> – viz výpočet v další podkapitole) a s ohledem na skutečnost, že neznáme obsah difuzního vodíku, navrhneme teplotu předehřevu pouze výpočtem dle Sэфariána (2.3 až 2.6) – přestože i tento vztah (koncipovaný spíše pro obloukové svařování) je vhodný pro uhlíkové a nízkolegované oceli s obsahem uhlíku vyšším než 0,1 hm. %, což použitý vzorek z hlediska svého chemického složení nesplňuje:

$$T_p = 350 \cdot \sqrt{C_p - 25} = 350 \cdot \sqrt{0,283 - 25} = 63,6^\circ\text{C} \approx 65^\circ\text{C} \quad (\text{dle 2.3})$$

kde  $T_p$  – teplota předehřevu [°C]

$$C_p = C_c + C_s = 0,279 + 0,004 = 0,283 [-] \quad (\text{dle 2.4})$$

$$C_c = \frac{360 \cdot C + 40 \cdot (\text{Mn} + \text{Cr}) + 20 \cdot \text{Ni} + 28 \cdot \text{Mo}}{360} = \frac{360 \cdot 0,065 + 40 \cdot (1,880 + 0,028) + 20 \cdot 0,023 + 28 \cdot 0,010}{360} = 0,279 [-] \quad (\text{dle 2.5})$$

$$C_s = 0,005 \cdot t \cdot C_c = 0,005 \cdot 3 \cdot 0,279 = 0,004 [-] \quad (\text{dle 2.6})$$

kde  $t$  – tloušťka plechu [mm]

Z uvedeného výpočtu vychází teplota předehřevu cca 65 °C, což se zdola přibližuje hodnotě teploty předehřevu volenou dle tabulky na obr. 33 (SSAB) pro materiál Strenx 700 (tedy Domex 700MC) při tloušťkách 30 mm. Závěr pro volbu předehřevu není tedy zcela jednoznačný, nicméně právě i toto bude do jisté míry předmětem zkoumání – z provedeného experimentu by totiž mělo nejen vyplynout, jakou vzdálenost wolframové elektrody od laserového svazku volit, nýbrž by měla být ověřena i samotná opodstatněnost předehřevu v rámci svařování plechů zvoleného materiálu a dané tloušťky.

### 3.1.2 Technologická svařitelnost oceli Domex 700 MC pomocí laseru s obloukovým předehřevem metodou TIG[ ]

Chceme-li posoudit technologickou svařitelnost materiálu Domex 700 MC laserem, není nic snazšího než stanovit množství vneseného tepla neboli tepelný příkon dle vztahu 2.13:

*Pozn.: Uvedené parametry laseru a předehřevu TIG vstupujících do následujících výpočtů byly nastaveny u všech svařovaných vzorků stejně na základě předchozích zkušeností.*

- Tepelný příkon pro samotné laserové svařování (kontinuální režim):
  - výkon laseru,  $P = 1200 \text{ W}$
  - rychlost svařování,  $v = 1200 \text{ mm/min}$
  - tepelná účinnost,  $k = 0,61$  až  $0,65$  pro laserové svařování penetračním režimem – voleno  $k = 0,63$
  - průtok ochranného plynu (100 % Argon)  $Q_v = 17 \text{ dm}^3/\text{min}$

$$Q_{LASER} = k \cdot \frac{P \cdot 60}{v \cdot 1000} = 0,63 \cdot \frac{1200 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 0,0378 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} = 37,8 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Tepelný příkon pro samotný předehřev metodou TIG:
  - Rychlost svařování,  $v = 1200 \text{ mm/min}$
  - Tepelná účinnost,  $k = 0,6$
  - Svařovací napětí,  $U = 13,5 \text{ V}$
  - Svařovací proud (stejnoseměrný),  $I = 40 \text{ A}$
  - TIG elektroda WT 20,  $\phi 2,4 \text{ mm}$  – obsahující 2% oxidů thoria (červené značení)
  - průtok ochranného plynu (100 % Argon)  $Q_v = 15 \text{ dm}^3/\text{min}$

$$Q_{TIG} = k \cdot \frac{U \cdot I \cdot 60}{v \cdot 1000} = 0,6 \cdot \frac{13,5 \cdot 40 \cdot 60}{1200 \cdot 1000} = 0,0162 \text{ kJ} \cdot \text{mm}^{-1} = 16,2 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

- Tepelný příkon pro laserové svařování s obloukovým předehřevem TIG:
  - je dán součtem výše spočtených tepelných příkonů

$$Q_{LASTIG} = Q_{LASER} + Q_{TIG} = 37,8 + 16,2 = 54,0 \text{ J} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Z uvedených výpočtů je patrné, že množství vneseného tepla není nikterak vysoké – je tedy možné předpokládat, že v rámci svařování nedojde k výraznému snížení mechanických vlastností, způsobeným právě přílišným vnesením tepla.

Vzhledem k tomu, že budou v rámci experimentu prováděny svary s předehřevem a svary s dohřevem, nebudeme se těmito technologickými aspekty více zabývat, neboť posouzení jejich vlivu na výslednou jakost svaru bude předmětem vyhodnocení experimentu. Rovněž teplotu interpass není třeba stanovovat, jelikož se bude jednat o zhotovování jednovrstvých svarů. Co však musí být zohledněno je volba ochranného plynu – v rámci svařování oceli Domex metodou TIG výrobcem doporučen argon, který usnadňuje zapálení oblouku, snižuje rozstřík roztaveného kovu a snižuje podíl oxidů. Tento bude tedy použit i pro účely našeho experimentu.

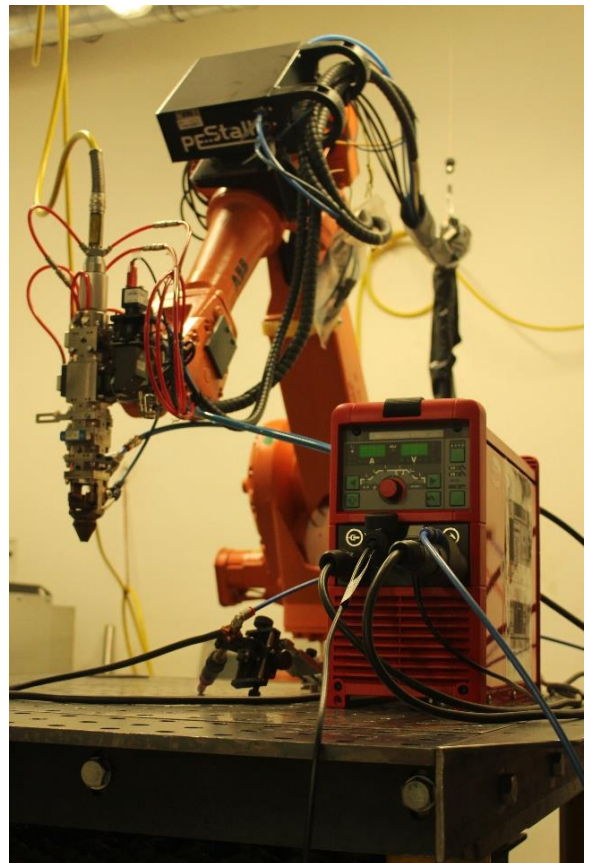


### 3.2 Provedení svarů

Vstupním materiálem pro vyhotovení vzorků, jež budou svařovány, byla tabule plechu 6000 x 1500 mm, tloušťky 3 mm z oceli Domex 700 MC (dle dnešního označení S 700 MC). Z této byly laserem nařezány zkušební vzorky 150 x 130 mm a to s ohledem na směr válcování plechu, aby byl v rámci pokusu odstíněn vliv anizotropních vlastností materiálu. Svarové plochy – tj. styčné plochy budoucího svaru byly zabroušeny brusným kotoučem o zrnitosti 120 jednak za účelem zarovnání těchto ploch a jednak za účelem odstranění okují vzniklých při laserovém řezání.

Pro samotné svařování, které probíhalo na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR v Brně (dále jen ÚPT) byla použita laserová stanice skládající se z těchto prvků:

- **Laserový zdroj Yb-YAG – YLS 2000**
  - Vlákňový pevnolátkový laser umožňující modulární uspořádání => výkon až 2000 W
  - Vlnová délka zdroje s aktivním prostředím Yb-YAG (yttrium-aluminium granát dopovaný ytterbiem)  $\lambda = 1060 \text{ nm}$  (infračervené záření)
  - Chlazený vodou; účinnost cca 30%
  - V rámci svařování umožňuje průvar až do hloubky 5 mm
  - Kontinuální a pulzní režim
  - Díky vyměnitelné hlavě laserové stanice je tento zdroj využitelný jak pro svařování, tak pro řezání, případně i gravírování.
- **Manipulační robot IRB 2400/16 společnosti ABB**
  - Šestiosý manipulační robot s vysokou přesností, spolehlivostí a univerzálností umožňující 3D polohování (polohová opakovatelnost 0,05 mm, opakovatelnost trajektorie – tj. dráhy pohybu 0,35 mm)
  - Nosnost ramene 20 kg, prostorový dosah 1550 mm
  - Použitelný pro různé technologické operace (svařování, řezání, broušení, gravírování apod.) tak pro prostou manipulaci
  - Během experimentu byla na rameni tohoto manipulátoru upevněna laserová svařovací hlava Precitec YW30 s ohniskovou vzdáleností 200 mm a průměrem spotu 0,41 mm s koaxiální tryskou + hořák zařízení TIG určený pro předehtřev či dohtřev svařovaných materiálů.
- **Dvouosý polohovací stůl**
  - Nosnost 200 kg
  - Rozsah pohybu 1600 mm
  - Přesnost cca 0,1 mm
  - Nastavitelná rychlost přesuvu

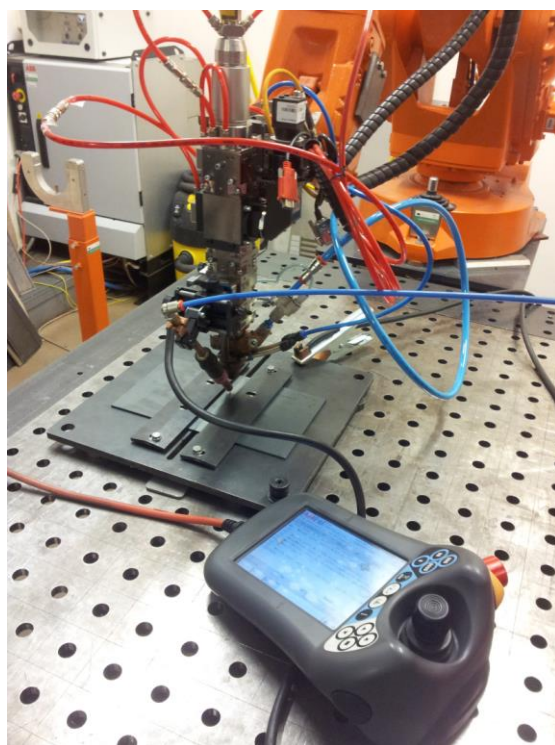


Obr. 34 Laserová stanice s invertorovým zařízením TIG na ÚPT AV ČR v Brně

Kromě laserové stanice byl použit pro účely předehřevu a dohřevu přídatný zdroj tepla TIG – konkrétně **digitálně řízený invertor Fronius MagicWave 1700**:

- tento vyniká svými malými rozměry a nízkou hmotností, úhrnem operativností (obr. 34)
- svařovací proud nastavitelný dle potřeby jako stejnosměrný či střídavý
- proudový rozsah tohoto zařízení se pohybuje v rozmezí 3 až 170 A
- nabízí velké množství přídatných funkcí pro zapalování a hoření oblouku – umožňuje nastavit až 100 libovolných programů (pracovní body včetně příslušných parametrů)
- provoz možno řídit pomocí dálkového ovládání

Po důkladné přípravě vzorků již nic nebránilo jejich svaření – to probíhalo tím způsobem, že nejprve byly oba kusy, přiložené k sobě navzájem zabroušenými plochami, upevněny do přípravku polohovacího stolu (- viz obr. 35). Následně byly tyto na okrajích přistěhovány k sobě, aby nedocházelo k rozevírání spáry mezi svařovanými plechy vlivem smršťování již chladnoucí svarové housenky (- to by mohlo způsobit neprovaření obou dílců). Proces svařování již poté probíhal dle parametrů uvedených v tabulce 4 – jedinou proměnnou tedy bylo použití/nepoužití předehřevu či dohřevu a v rámci použití těchto pak vzdálenost wolframové elektrody od laserového svazku.



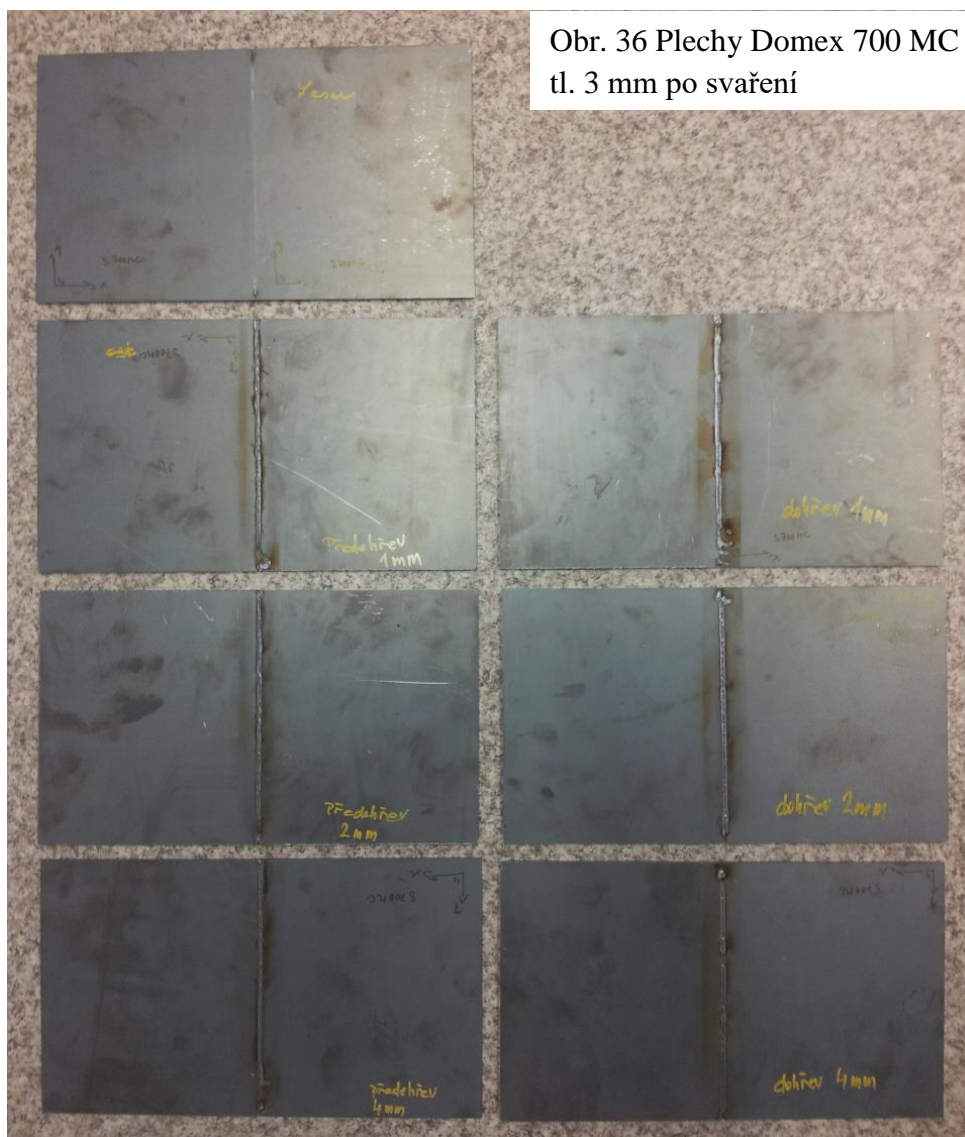
Obr. 35 Upnutí svařovaných plechů do přípravku polohovacího stolu

Tab. 4 Parametry laserového svařování s obloukovým předehřevem metodou TIG

Parametry laserového svařování s obloukovým předehřevem metodou TIG			
Výkon laseru P=2000 W	Rychlost svařování v=20 mm/s	Svařovaný materiál Domex 700 MC (S 700 MC)	Použitý ochranný plyn: Argon
Způsob laserového svařování	Vzdálenost elektrody TIG od laserového svazku	Svařovací proud I [A]	Svařovací napětí U [V]
Bez předehřevu/dohřevu	---	0	0
S předehřevem	1 mm	40	14
	2 mm	40	15
	4 mm	40	13,5
S dohřevem	1 mm	40	12,5
	2 mm	40	13
	4 mm	40	13

Výsledné svařence jsou znázorněny na obr. 36. Při letmém vizuálním posouzení bylo zřejmé, že největšího průvaru se dosáhlo u plechů svařovaných s předehřevem. Lze tedy očekávat, že právě takto zhotovené svary (tedy svary s předehřevem) budou vykazovat nejlepší mechanické vlastnosti. Pro potvrzení či vyvrácení této hypotézy je však nezbytné provést zkoušku tahem.

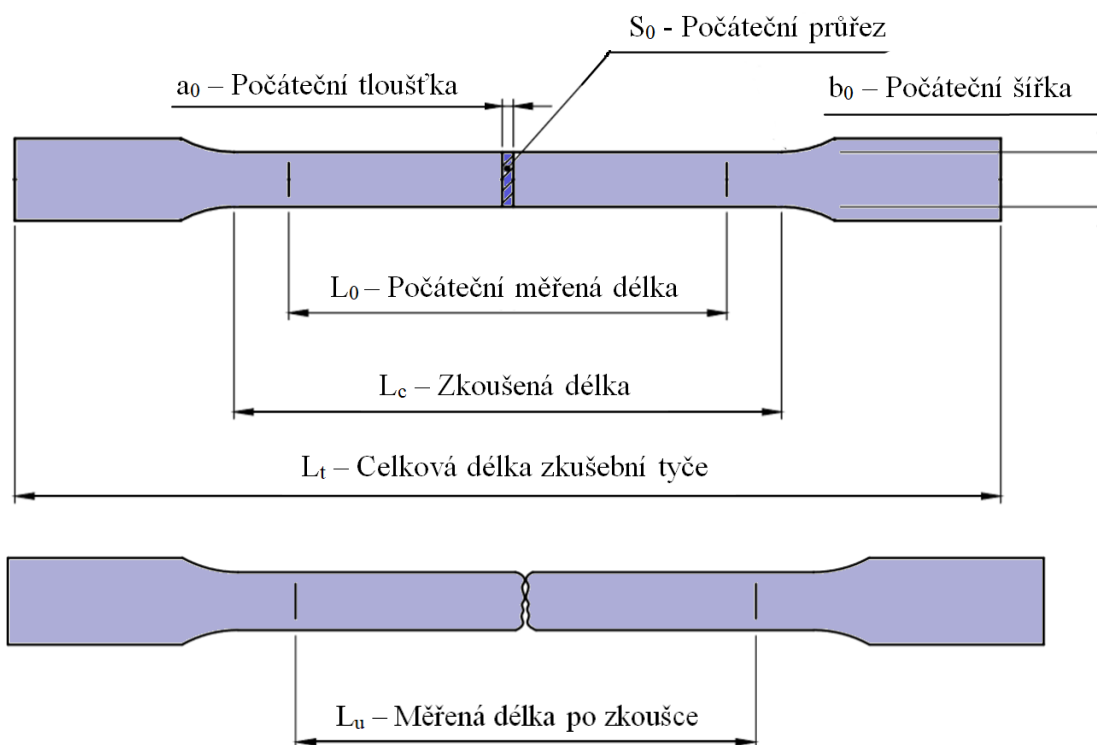




Obr. 36 Plechy Domex 700 MC  
tl. 3 mm po svaření

### 3.3 Zkouška tahem

Zkouška jednoosým tahem, specifikovaná normou ČSN EN ISO 6892 - 1 (též ČSN EN 10002) je z důvodu své jednoduchosti a účelnosti nejrozšířenější a nejuznávanější mechanickou zkouškou prováděnou k zjištění pevnostních a deformačních vlastností materiálu. Její princip spočívá v deformaci zkušební vzorku jednoosým tahovým zatížením obvykle do přetržení, přičemž je zaznamenávána síla  $F$  a prodloužení mezi ryskami  $L_u$  zkušební vzorku – výsledkem měření je tedy závislost síly  $F$  na absolutním prodloužení  $\Delta L = L_u - L_0$ . Samotná zkouška pobíhá při okolní teplotě v rozmezí 10°C až 35°C (- není-li stanoveno jinak) a rychlost zatěžování se pohybuje v intervalu od 0,5 do 2,0 mm/min. Jako zkušební tělesa přitom mohou posloužit normalizované tyče kruhového průřezu, případně ploché zkušební vzorky odebrané z plechu (obr. 37). Konce těchto těles bývají rozšířené za účelem snazšího upínání vzorků do trhačího stroje a rovněž proto, aby nedocházelo k jejich přetržení v blízkosti upínacích čelistí.



Obr. 37 Plochý zkušební vzorek – základní rozměry

*Praktická poznámka: Vyznačování rysek  $L_0$  by nesmí být provedeno vrypem (rýsovací jehlou), nýbrž popisem (např. permanentním fixem) – ryska provedená vrypem by mohla být vrubem, jenž by mohl vyvolat předčasný lom.*

Zkouška tahem nám umožní zjištění důležitých napěťových a deformačních veličin, které charakterizují tuhost, pevnost a tvárnost daného materiálu. Z těch napěťových je to především mez kluzu, která je definována jako napětí, při kterém dochází k prvním plastickým deformacím uvnitř zkoušeného materiálu a mez pevnosti, což je napětí odpovídající maximálnímu zatížení (též napětí na mezi nestability – tedy počátku nerovnoměrné deformace = tvorby krčku). Právě mez pevnosti je pro posouzení svařenců klíčovou hodnotou, neboť nám poskytuje názorné srovnání pevnosti svarů s pevností základního materiálu.

V rámci experimentu tedy byly ze svařených plechů laserem vyřezány vzorky pro zkoušku tahem. Mimo vzorků vyřezaných ze svařenců, byly zhotoveny i vzorky ze základního materiálu Domex 700 MC (též S 700 MC) a to se zohledněním orientace válcování, aby do výsledků této zkoušky nevstupoval vliv anizotropie vlastností daného materiálu. Ještě před realizací zkoušky byly na všech zkušebních tělesech lihovým popisovačem vyznačeny rysky vymezující počáteční měřenou délku  $L_0 = 80$  mm. Samotná zkouška tahem pak byla realizována na hydraulickém zkušebním stroji ZD40 (viz obr. 38 a Přílohu č. 2), který umožňuje provádění tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálu do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Přístroj je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60, která je speciálně navržena pro ovládání servo-hydraulických zkušebních strojů. Zvolená rychlost zkoušky činila  $13 \text{ MPa.s}^{-1}$  (dle normy se musí pohybovat v rozmezí mezi  $2 - 20 \text{ MPa.s}^{-1}$ ). Výsledky zkoušky jsou vyhodnoceny pomocí programu M – TEST v počítači, který zároveň umožňuje grafické zpracování průběhu zkoušky. (Přesnější specifikace zkušebního stroje a řídicí jednotky najdete v Příloze č. 2)



Obr. 38 Upnutí zkušebního tělesa do trhačího stroje ZD 40

Stav vzorků po tahové zkoušce je patrný z obrázků 39 až 41. Lom zkušebních těles zhotovených z plechů svařovaných s předehřevem proběhl ve všech případech v základním materiálu – viz obr. 40. Oproti tomu k přetržení vzorků svařovaných s dohřevem došlo vždy ve svaru, případně v tepelně ovlivněné oblasti. Způsob porušení celistvosti zkušebních vzorků svařených čistě laserem bez přídavného tepla se již lišil případ od případu – lom vzorku B proběhl v základním materiálu, kdežto u zbylých dvou došlo k lomu ve svaru resp. v tepelně ovlivněné oblasti. Jak lišila se pevnost svařenců od pevnosti vzorků ze základního materiálu lze vyčíst z následně zpracovaných smluvních tahových diagramů – obr. 42 až 49.



Obr. 39 Zkušební tělesa po tahové zkoušce – nahoře vyřezaná ze základního materiálu, dole vyřezaná z plechů svařených laserem ze přídavného tepla (tj. bez předehřevu či dohřevu)





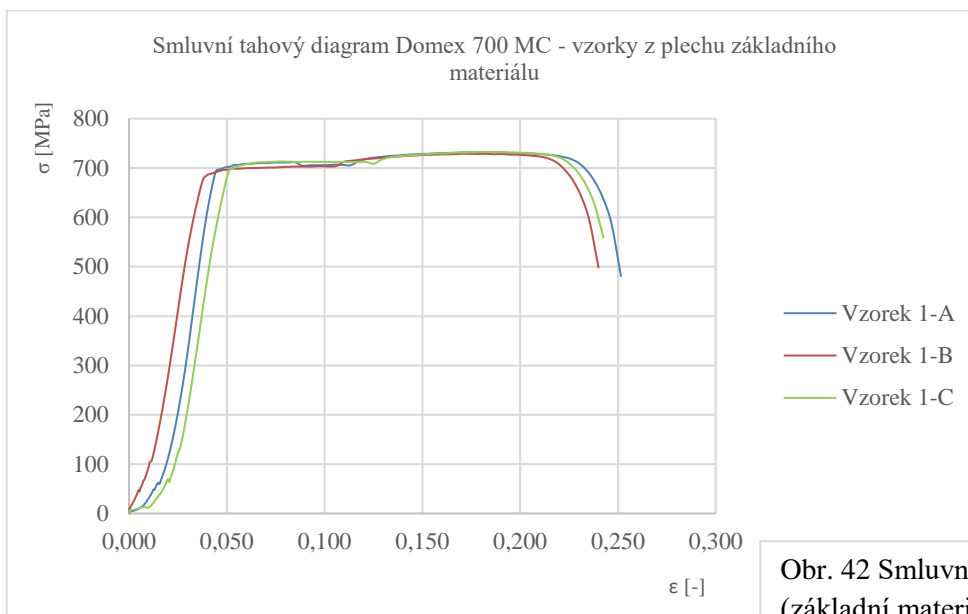
Obr. 40 Zkušební vzorky po tahové zkoušce zhotovené z plechů svařovaných laserem s obloukovým přehřevem při uvedených vzdálenostech elektrody TIG od laserového svazku (nahore 1 mm, vprostřed 2 mm, dole 4 mm)



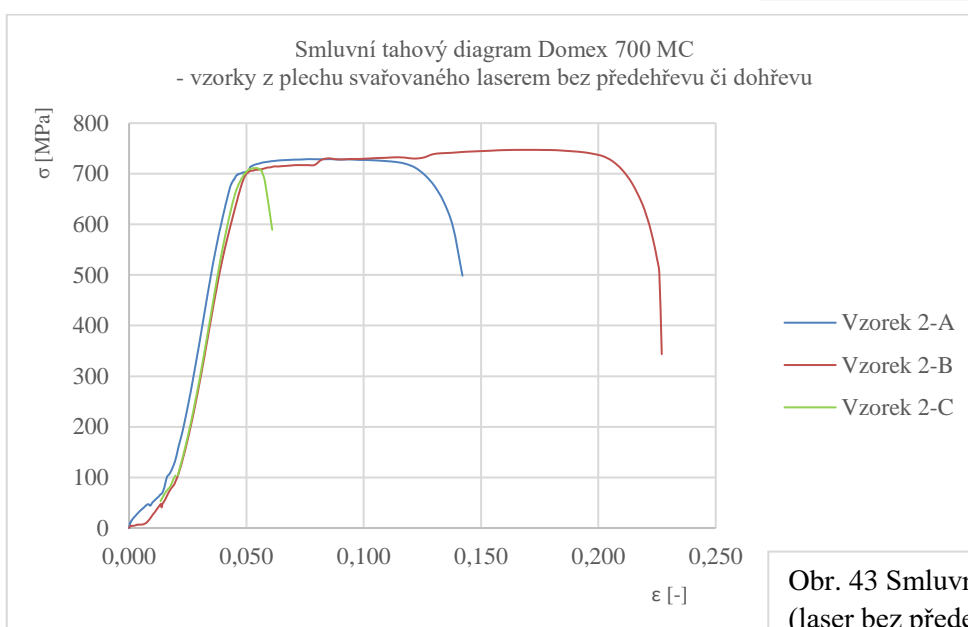


Obr. 41 Zkušební vzorky po tahové zkoušce zhotovené z plechů svařovaných laserem s obloukovým dohřevem při uvedených vzdálenostech elektrody TIG od laserového svazku (nahore 1 mm, vprostřed 2 mm, dole 4 mm)

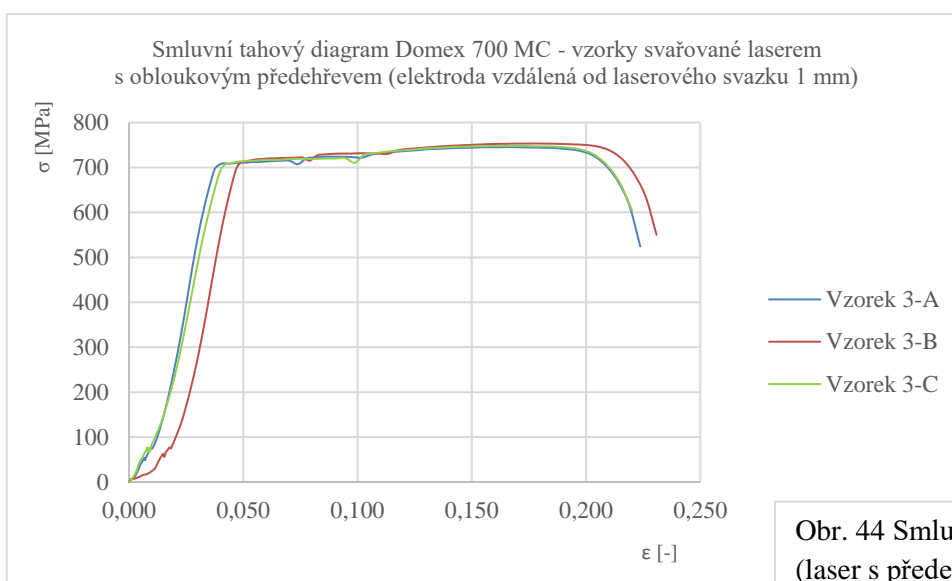
Přestože způsoby přetržení napříč všemi zkušebními vzorky navzájem lišily, pevnost těchto vzorků se nijak zvlášť neliší (téměř u všech dosáhla mez pevnosti  $R_m$  minimálně 700 MPa), nicméně nejlépe obstály vzorky svařené s předeřevem, kde docházelo k tvárnému lomu v rámci základního materiálu (- to je patrné z velikostí poměrných přetvoření  $\varepsilon$  [-] v průběhu tahové zkoušky – tj. do okamžiku, než došlo k tvárnému lomu).



Obr. 42 Smluvní tahový diagram  
(základní materiál Domex 700 MC)

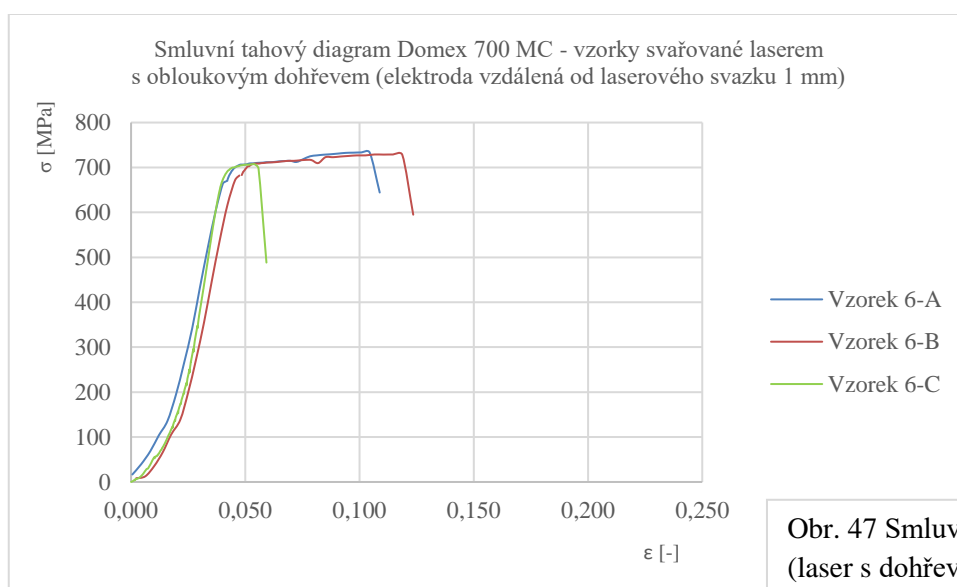
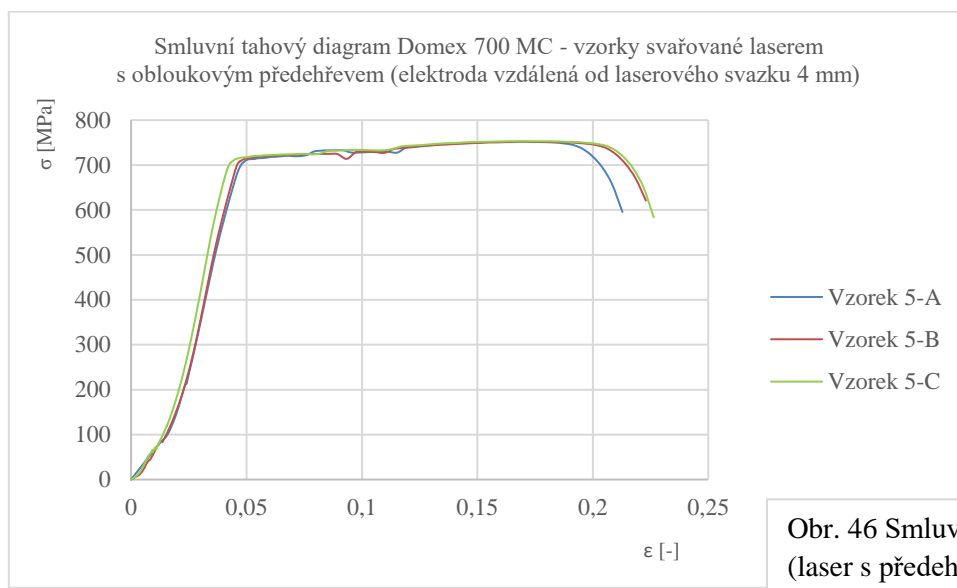
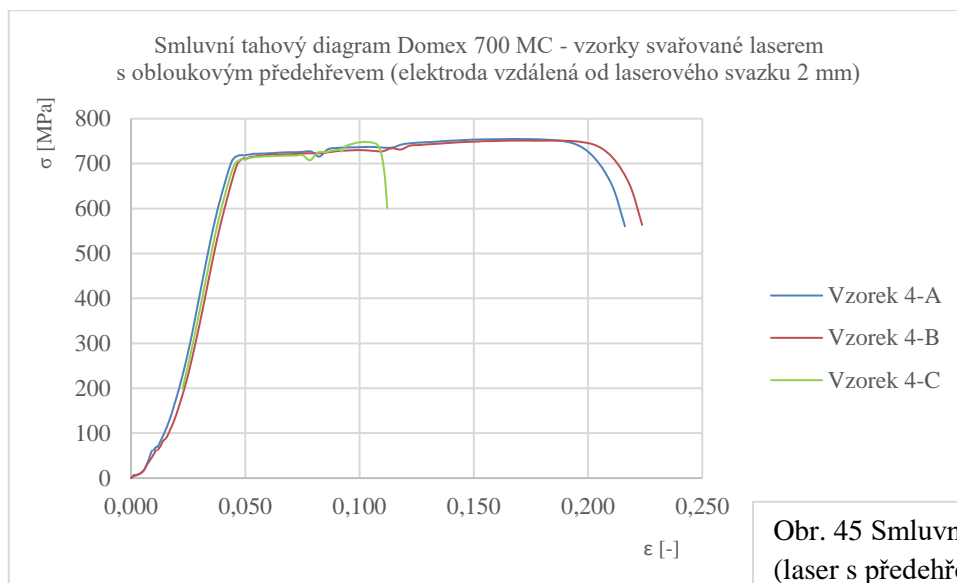


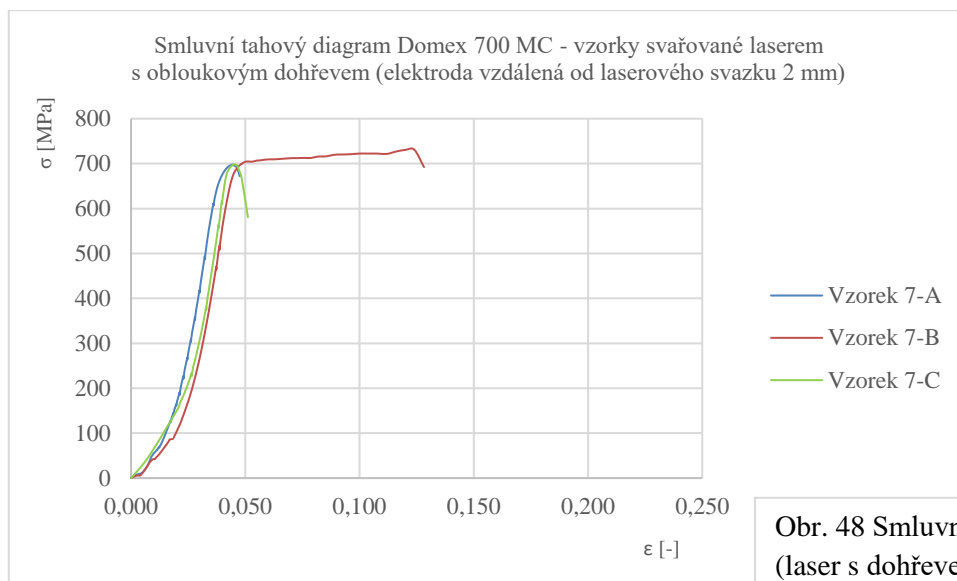
Obr. 43 Smluvní tahový diagram  
(laser bez předehřevu/dohřevu)



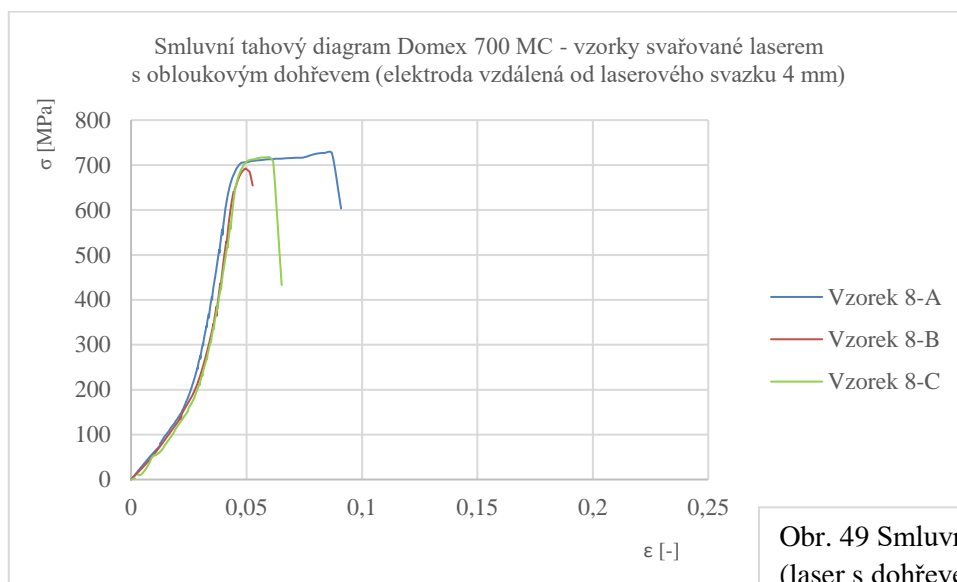
Obr. 44 Smluvní tahový diagram  
(laser s předehřevem –  $D_{LA}=1$  mm)







Obr. 48 Smluvní tahový diagram (laser s dohřevem –  $D_{LA}=2$  mm)



Obr. 49 Smluvní tahový diagram (laser s dohřevem –  $D_{LA}=4$  mm)

Abychom byli schopni detailněji posoudit kvalitu zhotovených svarů, bude nutné tyto podrobit zkoumání jejich makrostruktury a mikrostruktury.

### 3.4 Posouzení makrostruktury a mikrostruktury svaru

Vyhodnocení makrostruktury a mikrostruktury je prováděno na metalografických výbrusech, které by v ideálním případě měly reprezentovat celý pozorovaný vzorek. Příprava těchto výbrusů proběhla na Ústavu přístrojové techniky Akademie věd ČR v Brně v souladu s postupy popsány v normě ČSN EN ISO 17639:

- a) V první fázi bylo zvoleno reprezentativní místo v rámci vzorku (o velikosti cca 15 x 10 mm) vypreparovaného ze svařence prostřednictvím laserového řezání.
- b) V tomto zvoleném místě byl laboratorní pilou MTH Mikron 110 (obr. 50) učiněn řez. V rámci řezání vzorků je nutno dbát, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění struktury materiálu – z tohoto důvodu je pila osazena speciálním řezným kotoučem Struers tloušťky 0,5 mm a vybavena rozvodem chladicí kapaliny. Pro možnou rozlišitelnost jednotlivých vzorků po zalití do pryskyřice byly na některých zhotoveny zářezy – i u těchto je nutné dbát, aby nedošlo k tepelnému ovlivnění materiálu v blízkosti svaru.

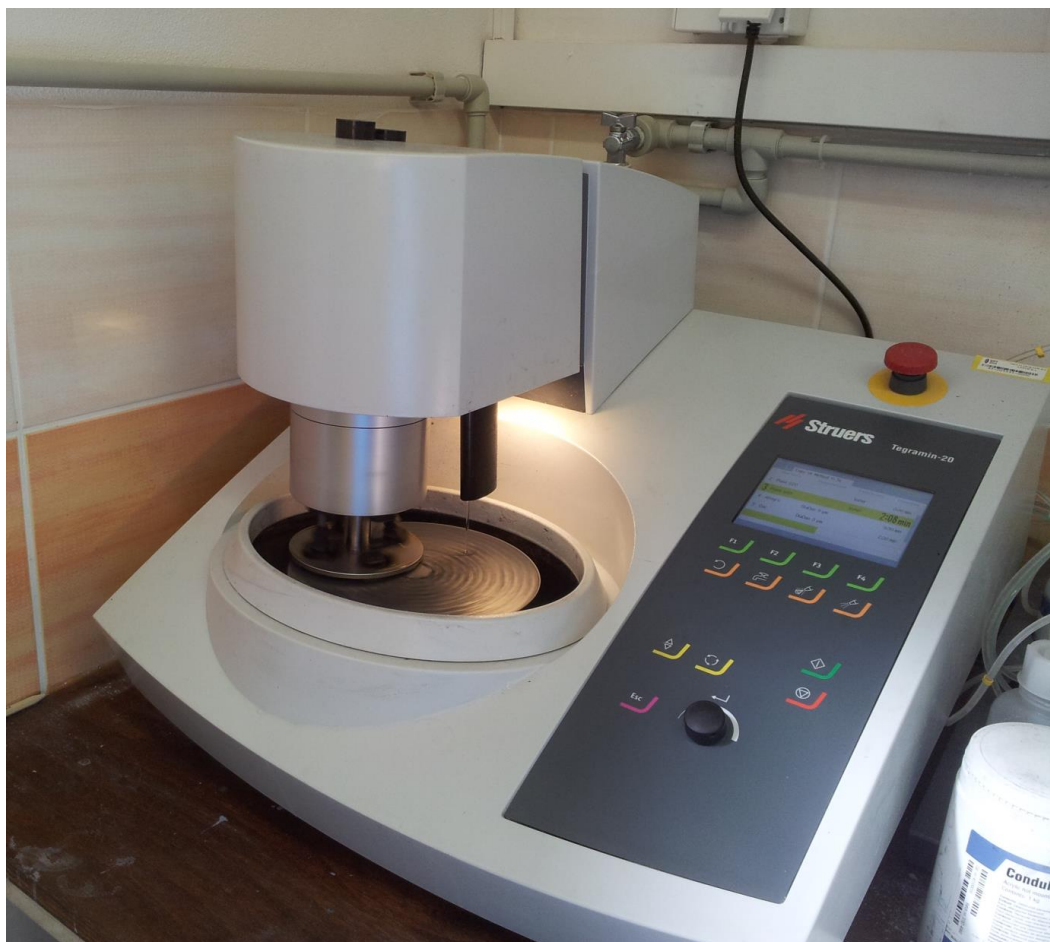


Obr. 50 Laboratorní pila MTH Mikron 110

- c) Po nařezání vzorků byly tyto odmaštěny od chladicí kapaliny a následně založeny do přístroje Struers CitoPress – 1, kde byly zasypány a posléze slisovány plastovou hmotou MultiFast Black při 180°C, tlaku 250 bar za dobu 3 min a 30 s (obr. 51).
- d) Vzorky takto uložené v plastových nosičích o průměru 30 mm byly upevněny do zařízení Struers Tegamin-20 (obr. 52), které umožňuje jejich broušení a leštění. V rámci broušení, jež probíhalo za důkladného chlazení, bylo postupně použito brusných kotoučů MD-Piano o zrnitosti 120, 220 a 600; k leštění pak bylo použito diamantové suspenze DiaDuo-2 (9 μm, 3 μm a 1 μm), s nosiči MD-Allegro (9 μm), MD-Dac (3 μm) a MD Nap (1 μm).

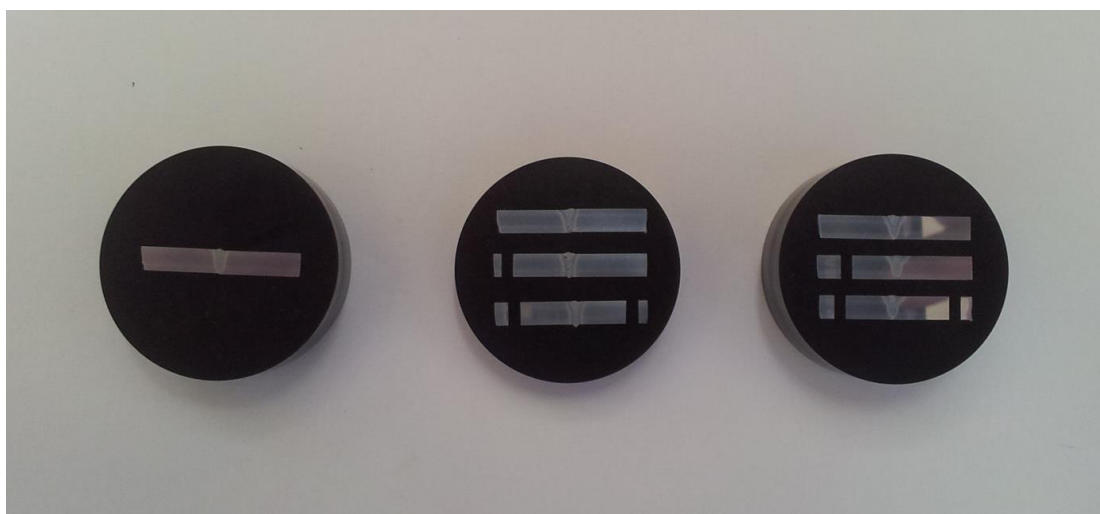


Obr. 51 Zalísování vzorku do plastové hmoty



Obr. 52 Metalografická bruska Struers Tegramin-20

- e) Vyleštěné vzorky již vykazovaly zrcadlový povrch, nicméně pro zvýraznění struktury svaru bylo provedeno leptání pomocí leptadla Nital ( $3\% \text{HNO}_3 + 97\% \text{C}_2\text{H}_6\text{O}$ ), jež na jejich povrch působilo 2 až 3 sekundy. Posléze byly vzorky opláchnuty vodou a lihem, čímž byla jejich příprava ukončena – výsledek viz na obrázku 53.



Obr. 53 Vyleptané metalografické vzorky



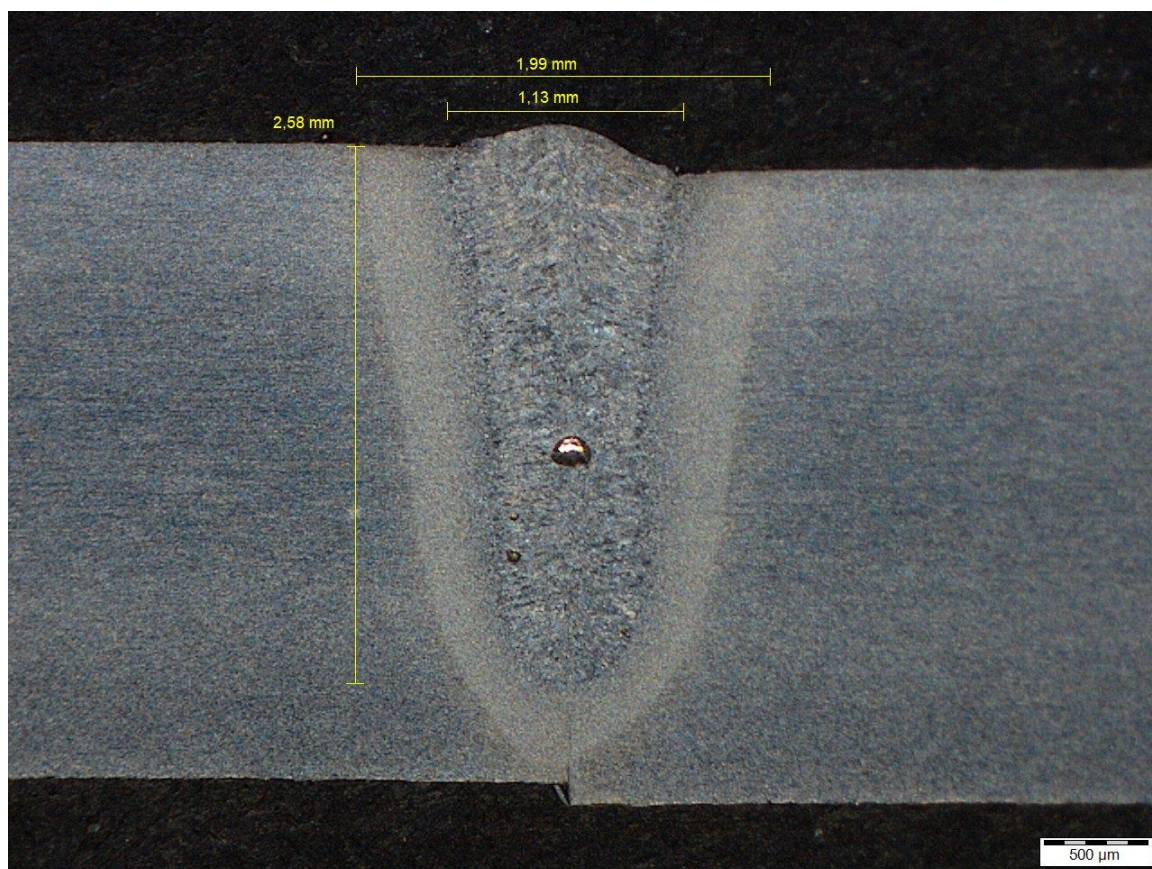
### 3.4.1 Makrostruktura svaru

Vyhodnocení makrostruktury svaru nám umožňuje posoudit rozměry svaru – přesněji řečeno hloubku průvaru a šířku svaru (tj. šířku svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti). Dále může toto vyhodnocení poukázat na některé svarové vady, jako je pórovitost, přítomnost vměstků apod. Snímky makrostruktury svarů zhotovených v rámci experimentu byly pozorovány a snímány pomocí optického mikroskopu Olympus SC 50 (obr. 54).

Z obrázků 55 až 61 je zřejmé, že nejužšího svaru a tím i nejužší tepelně ovlivněné oblasti bylo dosaženo při svařování samotným laserem – je tomu tak z důvodu nejmenšího vneseného tepla, koncentrovaného na velmi malou plochu. S ohledem na neprovaření kořene takto zhotoveného svaru lze usuzovat, že by bylo vhodné množství vneseného tepla navýšit.



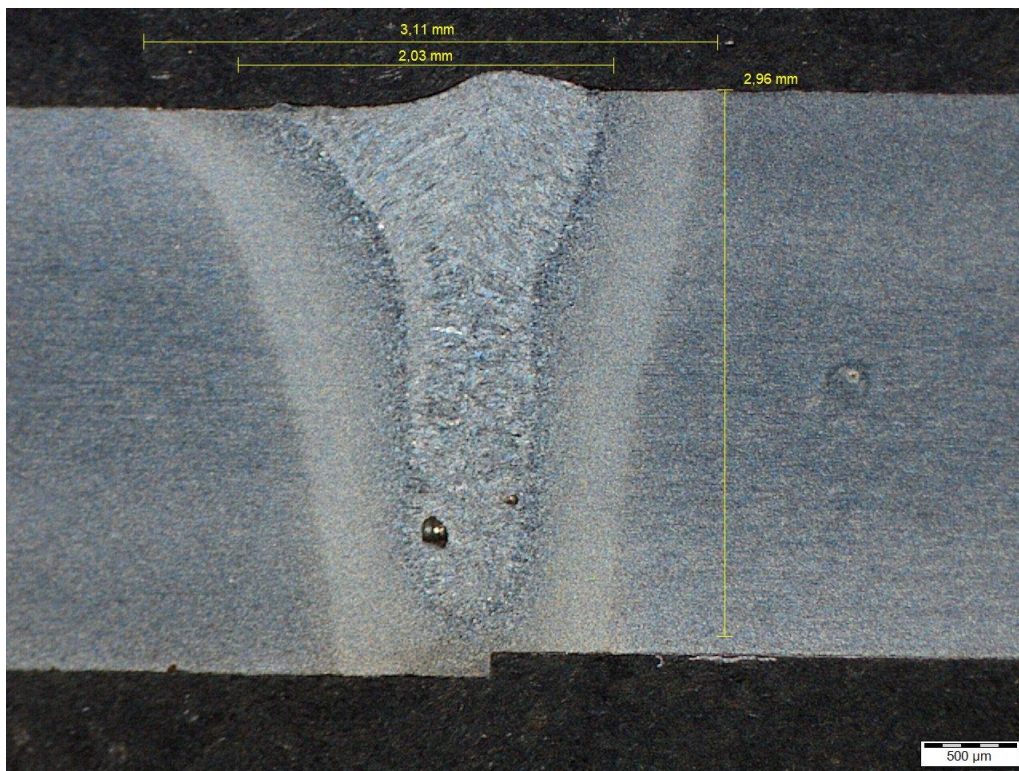
Obr. 54 Optický mikroskop Olympus SC 50



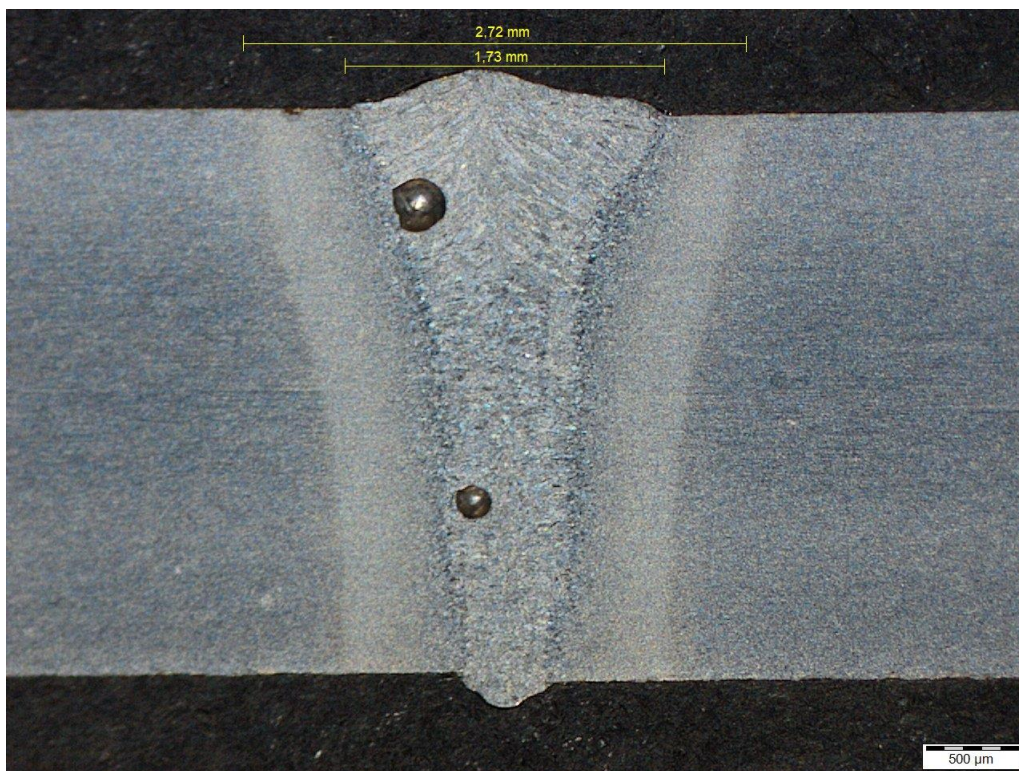
Obr. 55 Svar zhotovený samotným laserovým svazkem (bez předeřevu či dohřevu)



Toto navýšení bylo provedeno nejprve prostřednictvím obloukového přehřevu při proměnných vzdálenostech wolframové elektrody od laserového svazku (obr. 56 až 58). Největšího průvaru bylo přitom dosaženo při vzdálenostech 2 mm a 4 mm. Z hlediska mechanického posuzování (zkouška tahem) však tato skutečnost neměla zásadního významu.

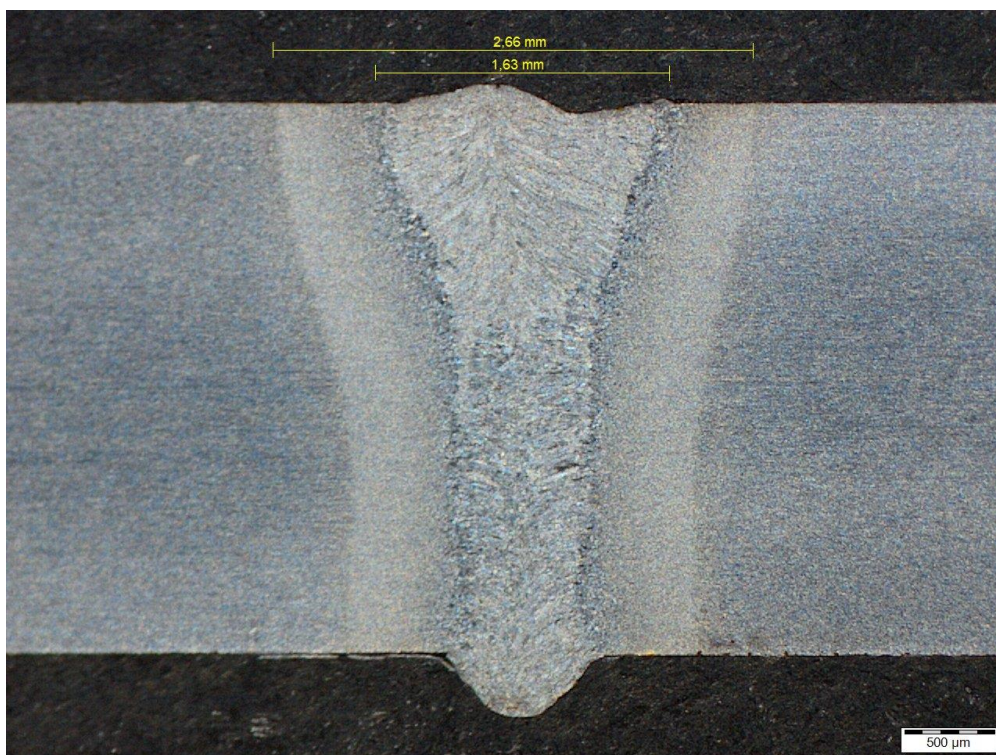


Obr. 56 Makrostruktura svaru (laser s přehřevem TIG – vzdálenost elektrody 1 mm)



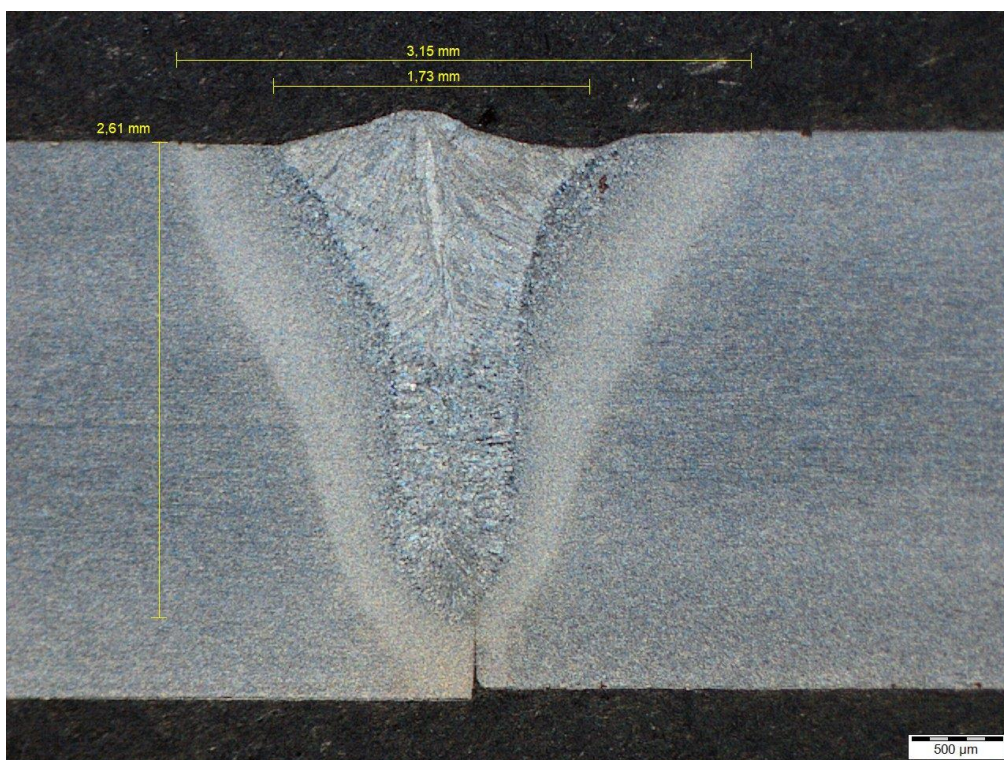
Obr. 57 Makrostruktura svaru (laser s přehřevem TIG – vzdálenost elektrody 2 mm)





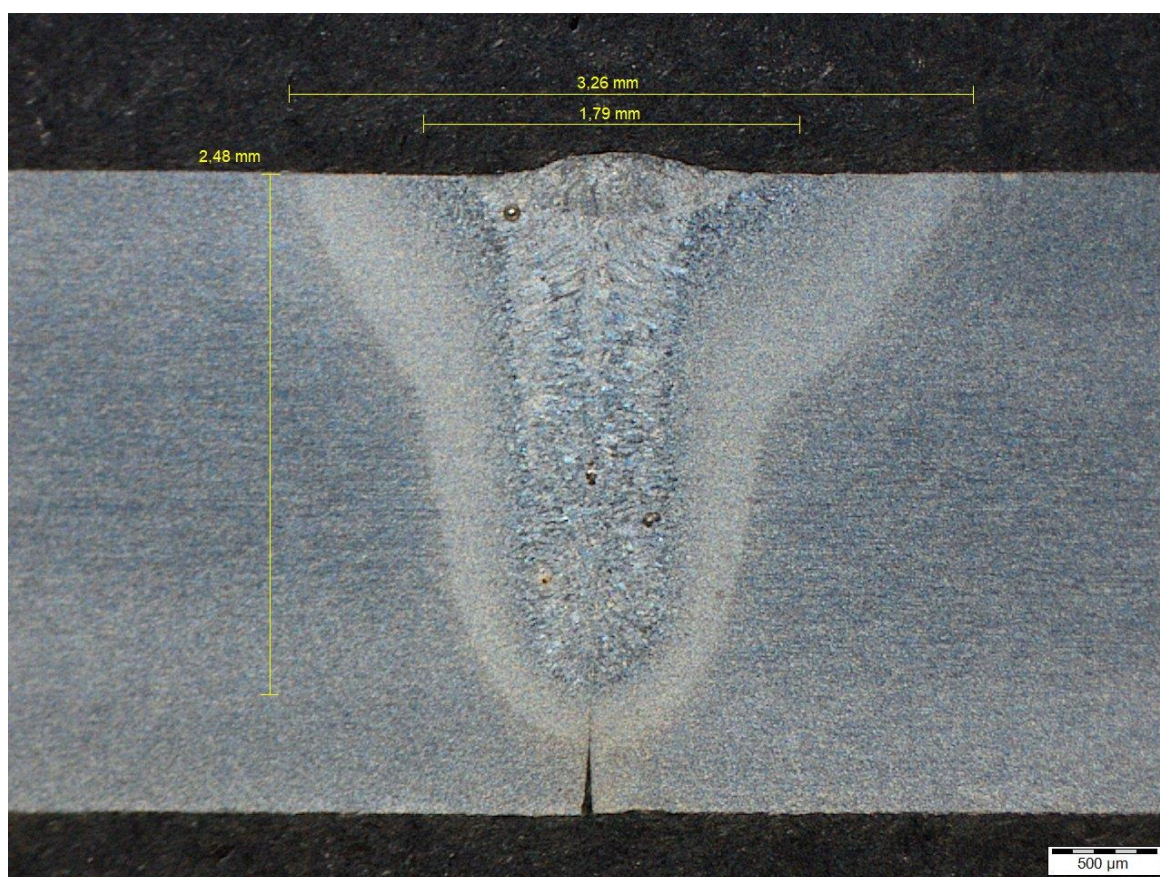
Obr. 58 Makrostruktura svaru (laser s předehřevem TIG – vzdálenost elektrody 4 mm)

Posléze byl celkový tepelný příkon navýšen namísto předehřevu obloukovým dohřevem – rovněž při proměnných vzdálenostech elektrody od laserového paprsku. Z pořízených makrostrukturních snímků (viz níže) lze usuzovat, že takto vnesené teplo nepřináší takový užitek jako v případě předehřevů – všechny svary s dohřevem totiž vykazovaly neprovařený kořen a rozšířenou tepelně ovlivněnou oblast.

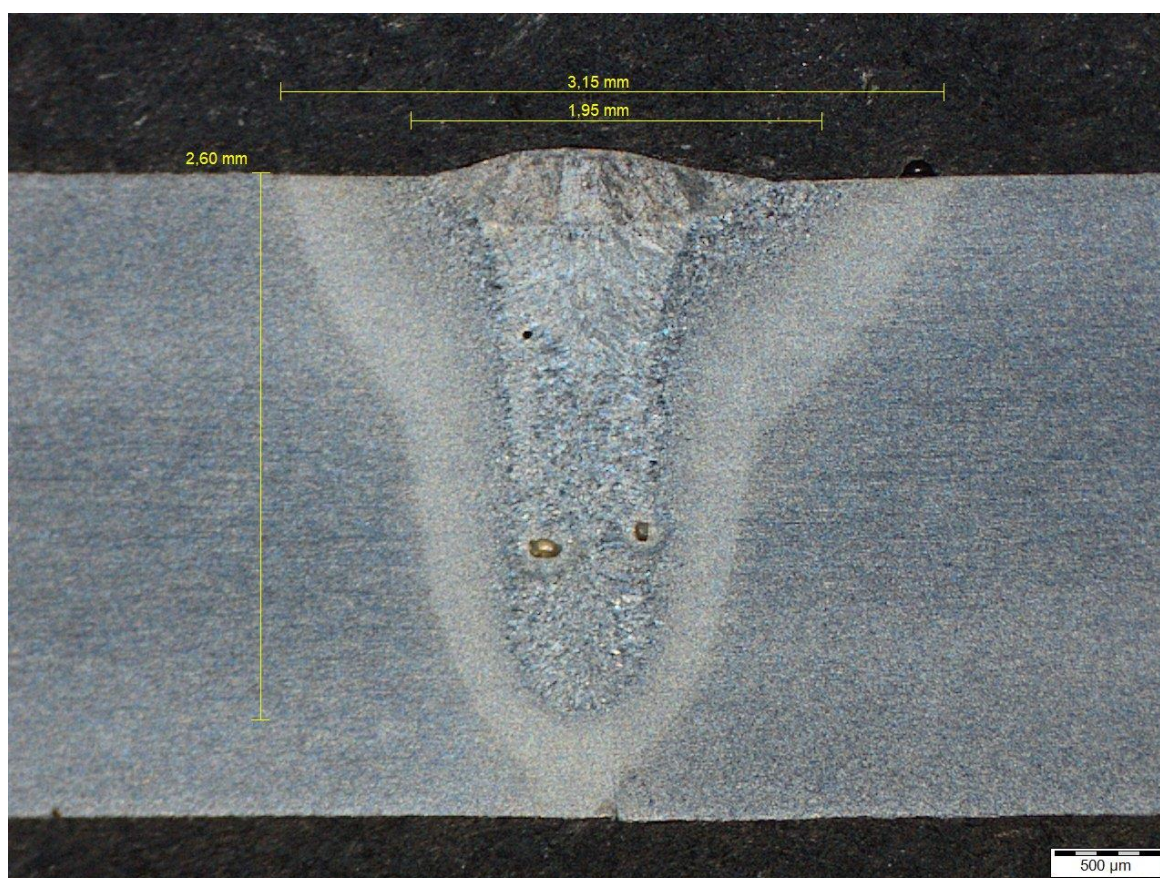


Obr. 59 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 1 mm)





Obr. 60 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 2 mm)

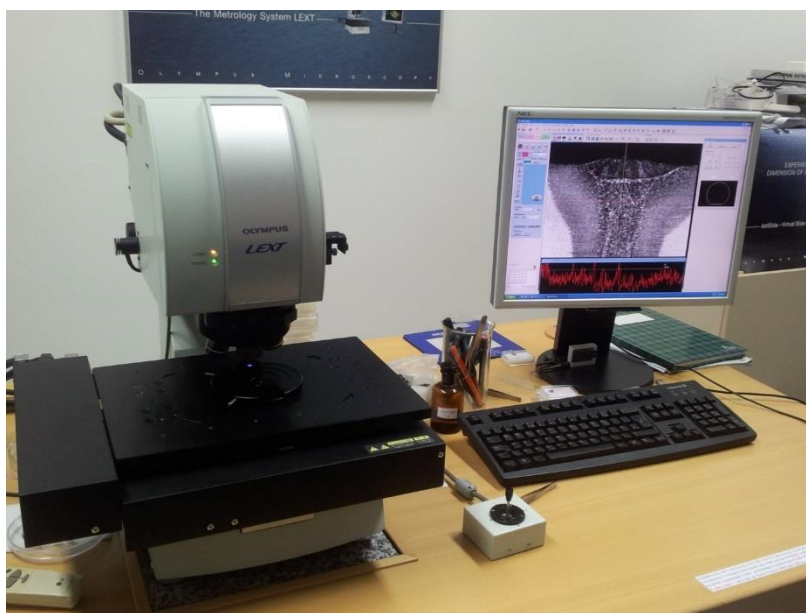


Obr. 61 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 4 mm)



### 3.4.2 Mikrostruktura svaru

Snímky mikrostruktury byly pořízeny pomocí konfokálního laserového rastrovacího mikroskopu Olympus LEXT 3100 (obr. 62) na ÚPT AV ČR v Brně. Struktura byla zobrazována za běžného osvětlení ve standardním režimu 2D při 2400-násobném zvětšení, které umožňuje pozorování struktury na úrovni zrn. Vytvořené fotografie byly upraveny v programech LEXT-OLS a za účelem zpracování do této diplomové práce pak v programu GIMP – Image Manipulation Program.



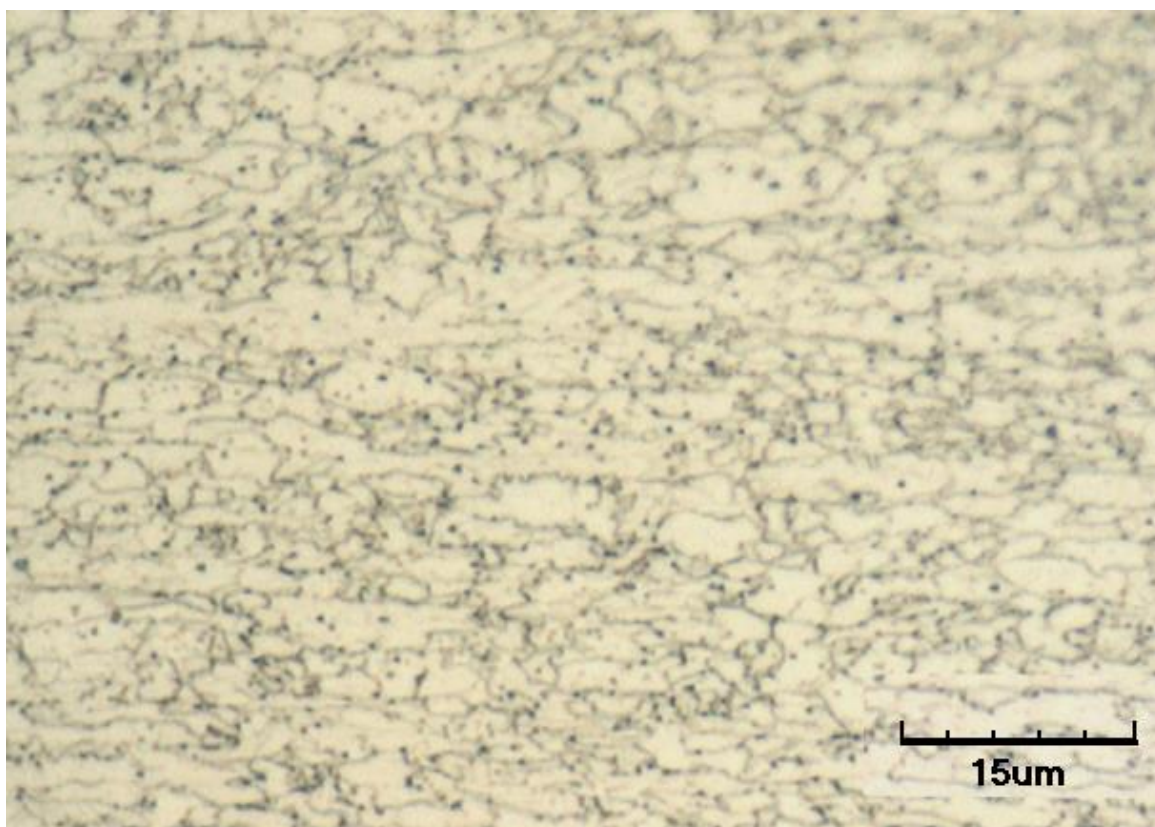
Obr. 62 Konfokální mikroskop Olympus LEXT 3100

Snímek 61 poskytuje obecný náhled na protažená zrna válcované jemnozrné struktury oceli Domex 700 MC, která dána mikrolegováním a důsledným a přesně definovaným procesem válcování za tepla.

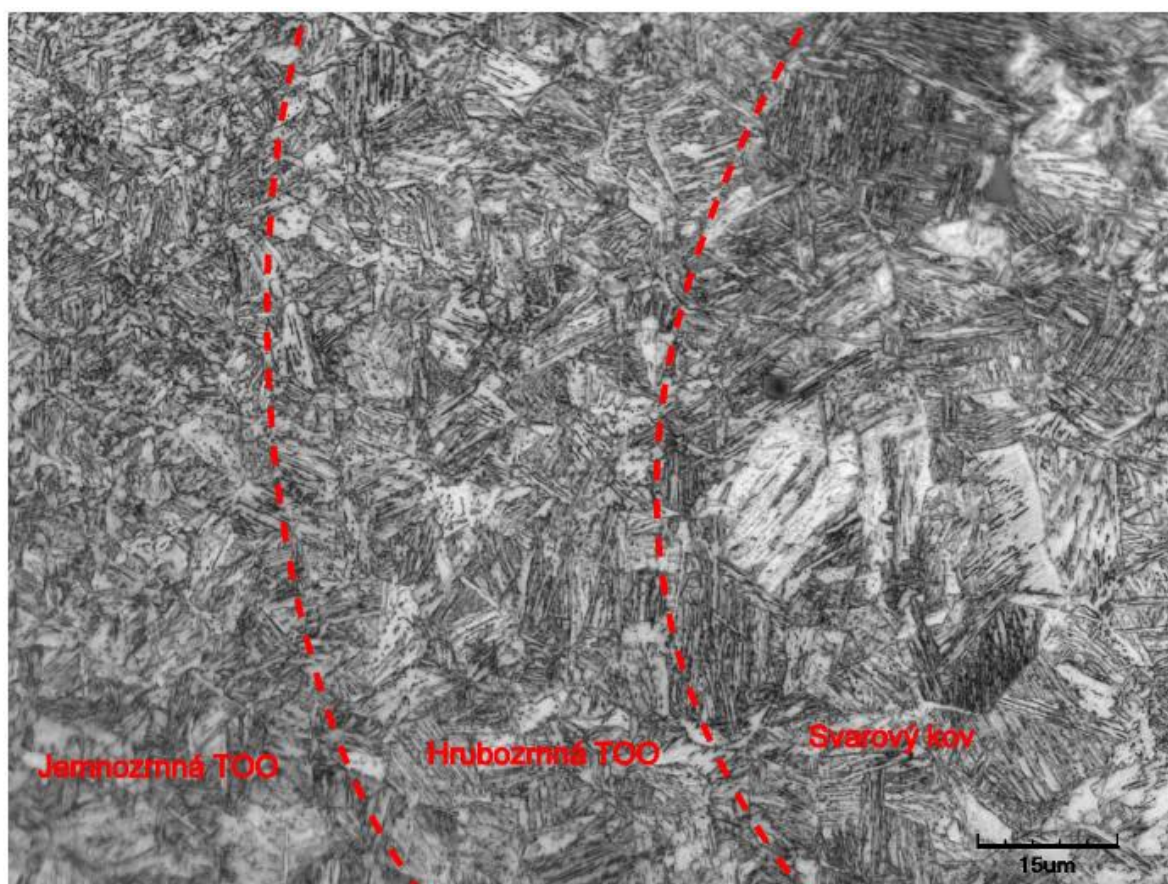
Obrázek 64 pak již znázorňuje mikrostrukturu svaru a tepelně ovlivněné oblasti, kterou obecně můžeme rozdělit na hrubozrnou a jemnozrnou (viz podkapitolu 2.6.1). Přestože mezi těmito oblastmi neexistuje jasně dané rozhraní (tedy přechod z jednoho pásma do druhého je plynulý), lze tyto s poměrnou zřetelností odlišit. Struktura svarového kovu může být tvořena martenzitem, jehož tvrdost je odvislá od obsahu uhlíku v materiálu – vzhledem k tomu, že se jedná o nízkouhlíkovou ocel, nebude tvrdost této strukturní části dosahovat příliš vysokých hodnot. Struktura tepelně ovlivněné oblasti pak může být bainitická či postupně (jak se vzdalujeme od svarového kovu) feriticko-bainitická popř. feriticko-perlitická. Toto je však možné s jistotou určit pouze na základě rentgenové difrakce či difrakce zpětně odražených elektronů na elektronovém mikroskopu – v rámci této práce se tedy opírám o dosavadní zkušenosti a poznatky paní Ing. Mgr. Šebestové, Ph.D., pod jejíž vedením zkoumání mikrostruktury probíhalo.

Tentýž náhled jako obrázek 64 nabízí snímek 66, na němž je zobrazena mikrostruktura svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti svaru zhotoveného s předehřevem (vzdálenost elektrody od laserového svazku 1 mm). Vlivem většího vneseného tepla je přechod ze svarového kovu do hrubozrné a následně jemnozrné oblasti pozvolnější a tím z hlediska posuzování mikrostruktury ještě méně zřejmý.

Přechod mezi jemnozrnou tepelně ovlivněnou oblastí (zjemněnou normalizací) a základním materiálem je znázorněn na obrázku 67 – je z něho zřejmé, že tepelně ovlivněná oblast vykazuje v tomto přechodu větší jemnozrnnost, než je v případě základního materiálu. Podobně jako v předchozím případě nelze s jistotou stanovit hranici tohoto přechodu – pro její přesnější stanovení nám však může pomoci měření tvrdosti dle Vickerse.

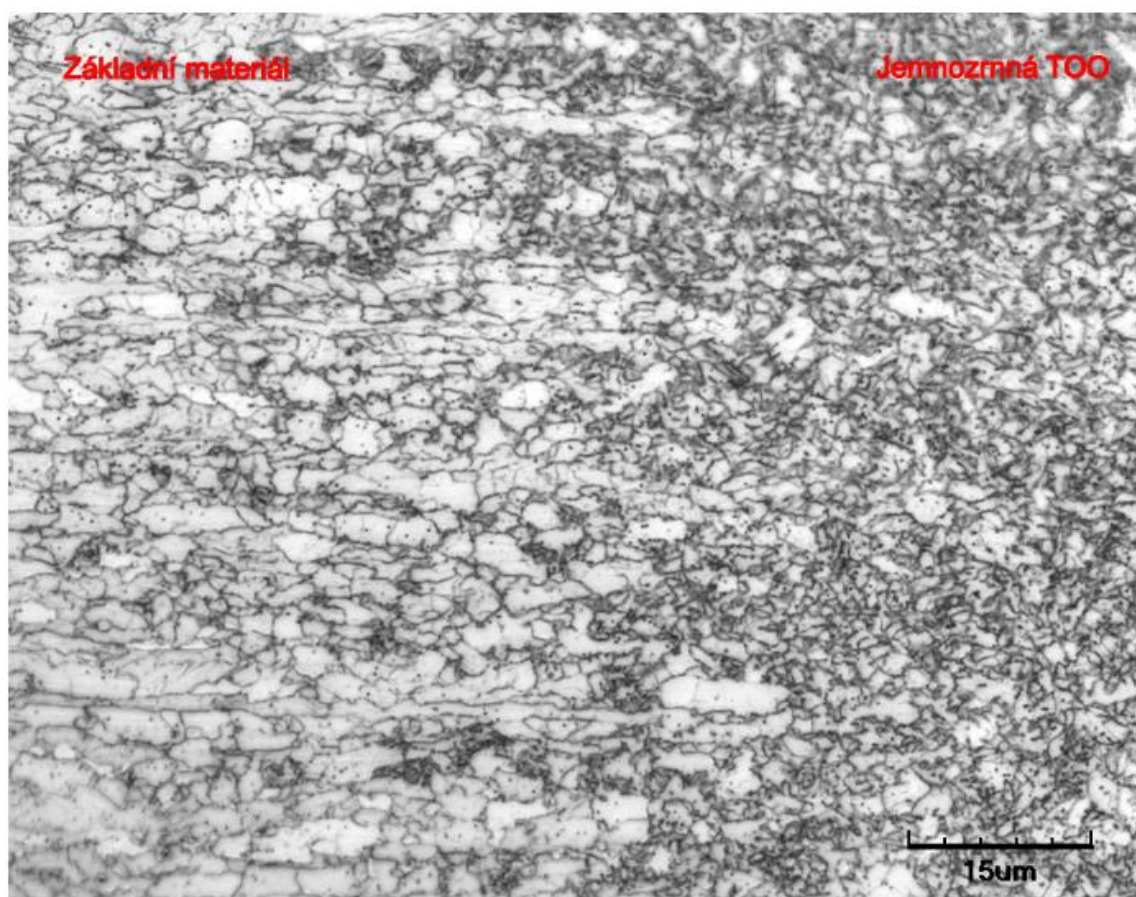


Obr. 63 Jemnozrná struktura základního materiálu Domex 700 MC

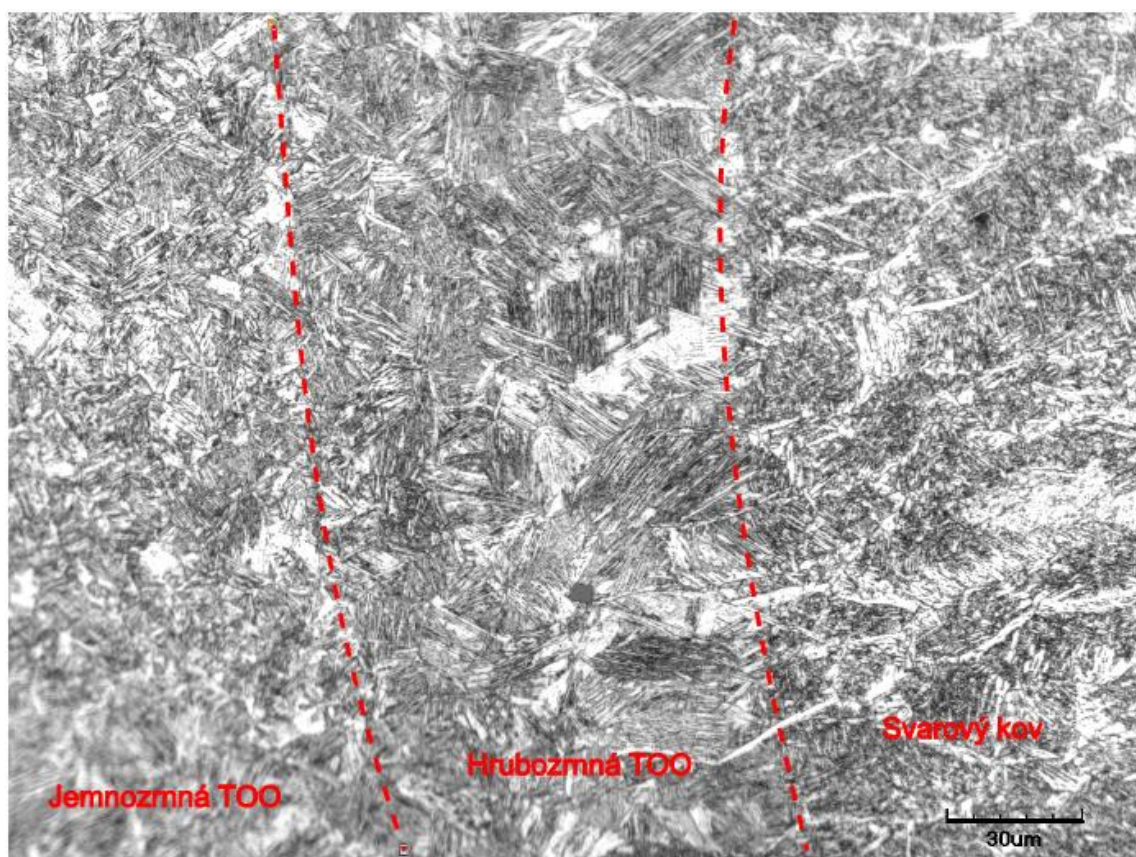


Obr. 64 Mikrostruktura svarového kovu a TOO (laser bez předehřevu/dohřevu)





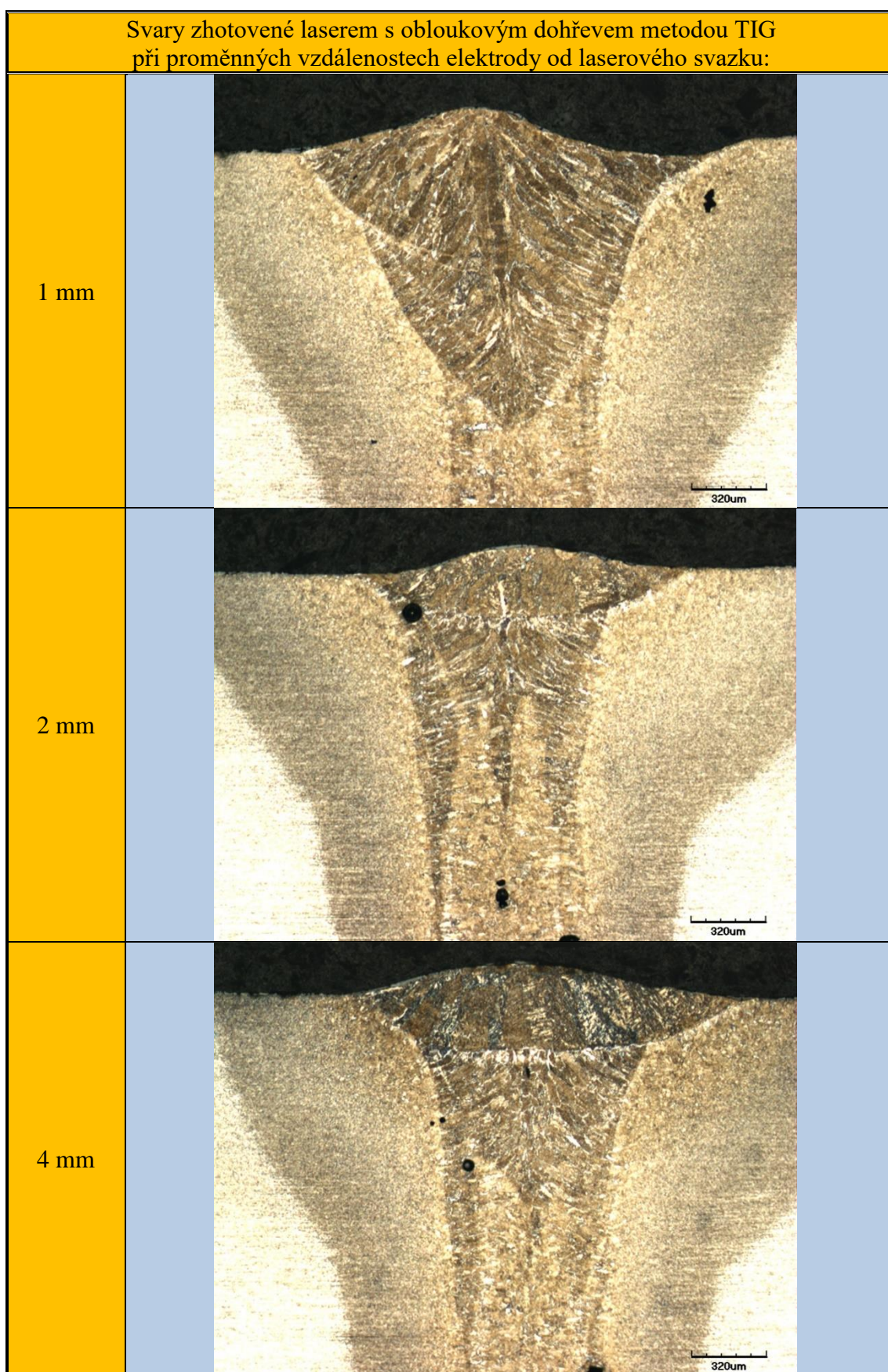
Obr. 65 Přejchod jemnozrné TOO do základního materiálu (laser bez předehřevu/dohřevu)



Obr. 66 Mikrostruktura SK a TOO (laser s předehřevem – elektroda 1 mm od laserového svazku)



Obr. 67 Detailní makrostruktura svarů zhotovených laserem s dohřevem





Svary, u nichž byl proveden dohřev vykazují jednak neprovaření v oblasti kořene a jednak rozšíření oblasti svarového kovu a TOO v místě líce svaru (obr. 67). V otázce, čím je tato struktura tvořena, by mohla napovědět zkouška tvrdosti dle Vickerse, nicméně v otázce, jakým dějům zde dochází v rámci samotného svařování, dohřevu a následného ochlazování by bylo zajímavé provést počítačovou simulaci celého procesu.

### 3.5 Zkouška tvrdosti dle Vickerse

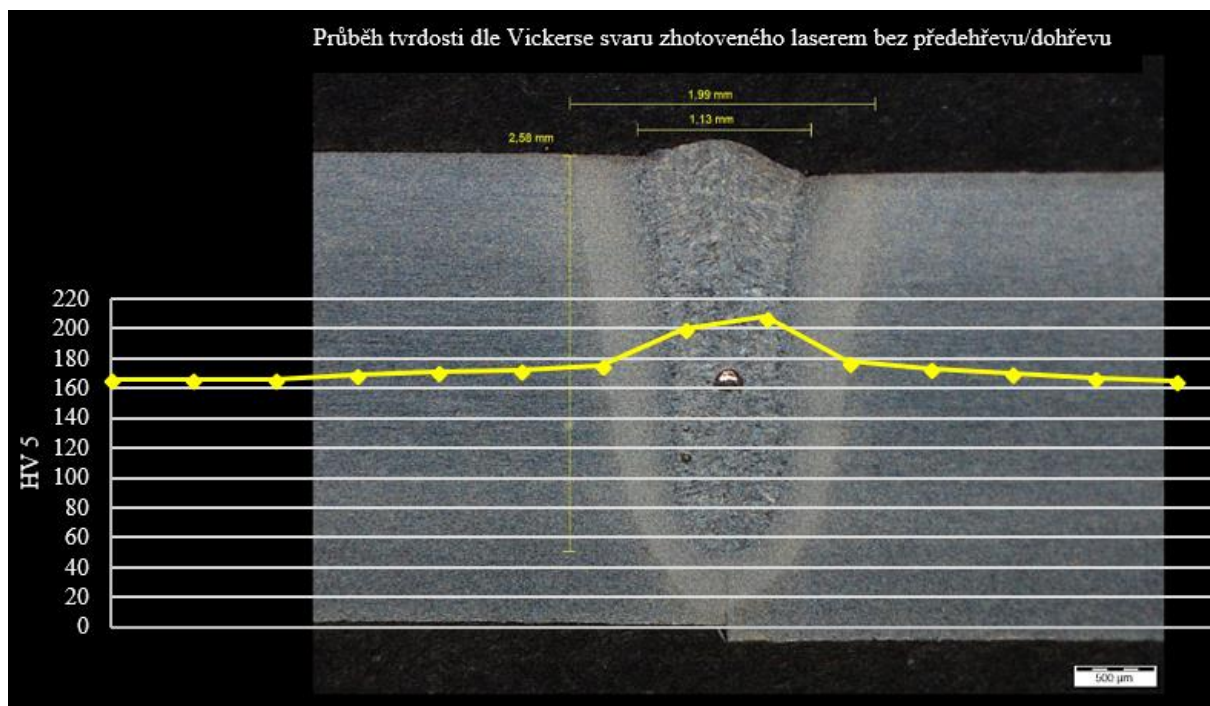
Zkouška tvrdosti dle Vickerse, specifikovaná normou ČSN EN ISO 6507-1, spočívá ve vtlačování pravidelného čtyřbokého diamantového jehlanu zatěžující silou působící ve směru kolmém k ploše vzorku po stanovenou dobu. Tvrdost podle Vickerse je vyjádřena jako poměr zkušebního zatížení k ploše povrchu vtisku. (Jednotka se v případě tvrdosti neuvádí, nicméně z definice odpovídá jednotce  $\text{N/mm}^2$ .) V závislosti na tom, na jakém materiálu je zkouška prováděna je volena zatěžující síla, která se standardně pohybuje v rozmezí od 49,03 do 980,7 N, což je uváděno i v symbolickém zápisu naměřené tvrdosti – HV 5 až HV 100 (např. při zatížení 5 kg – tj. přibližně 50 N zapisujeme HV 5 + naměřená hodnota tvrdosti).

V rámci experimentu bylo měření tvrdosti prováděno na zkušebním stroji (tvrdoměru) Zwick 3212 (obr. 68) při zatížení 5 kg po dobu 20 s po krocích 0,5 mm – byla tedy měřena tvrdost dle Vickerse HV 5. Povrch vzorku, snímáný CCD kamerou zabudovanou ve zkušebním stroji, byl promítán na monitor počítače, kde byly skrze ruční nastavení měřicích rysek změřeny úhlopříčky vtisku a následně, prostřednictvím softwaru testXpert, vyhodnoceny jednotlivé tvrdosti.

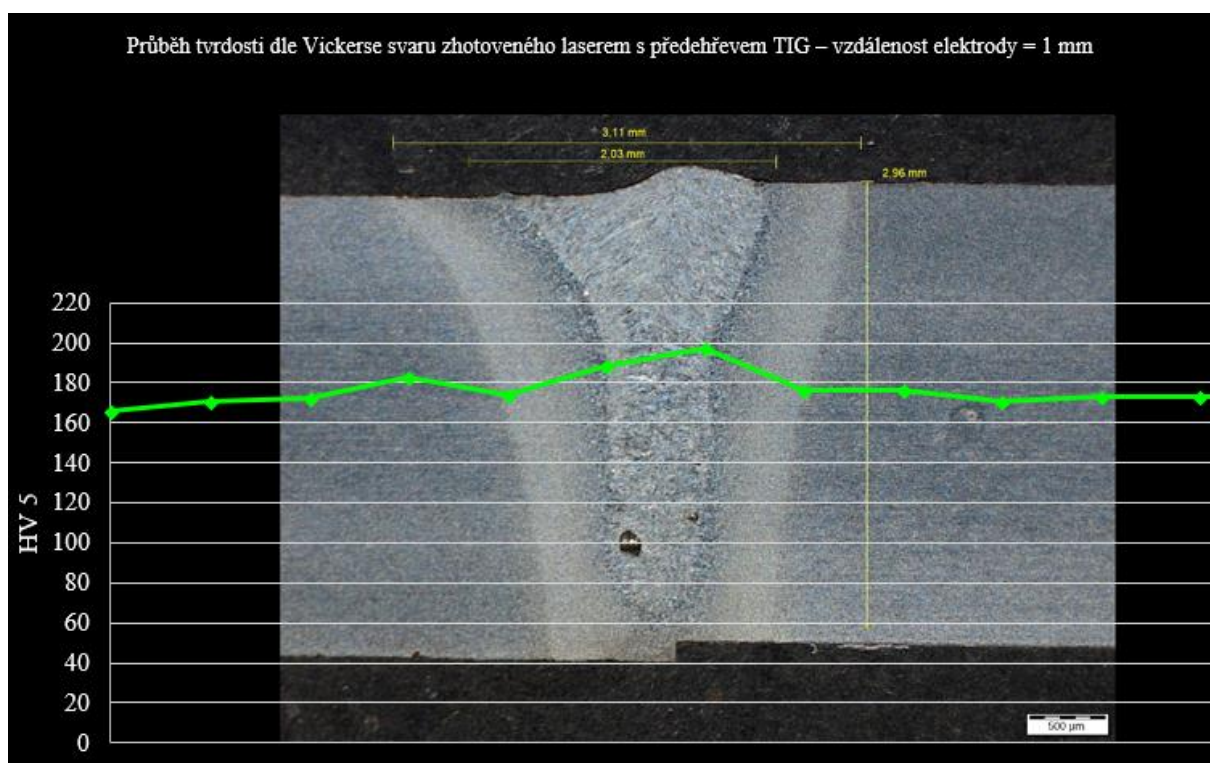


Obr. 68 Tvrdoměr Zwick 3212

Průběhy tvrdostí napříč jednotlivými vzorky jsou patrné z obrázků 69 až 75. U všech byly největší tvrdosti naměřeny v místě svarového kovu, popř. v přechodu svarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti. Oproti svarům svařovaným čistě laserem (tj. bez předeřevu a dohřevu) dosahovaly tyto v případě svarů s předeřevem i svarů s dohřevem nižších hodnot (cca o 5 až 10 HV) – lze tedy předpokládat, že struktury svarových kovů nejsou u těchto vlivem ochlazování tolik zakaleny jako v případě svarů zhotovených bez vnesení přídavného tepla.



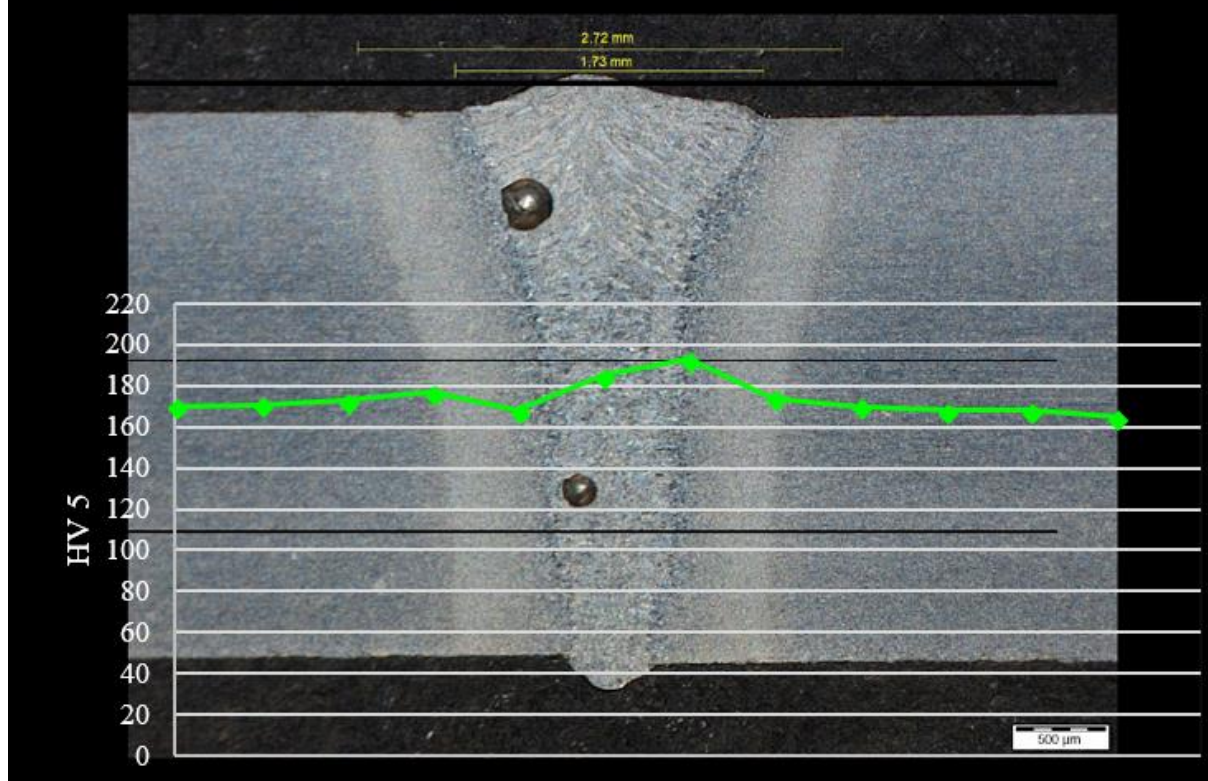
Obr. 69 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem zhotoveným samotným laserem



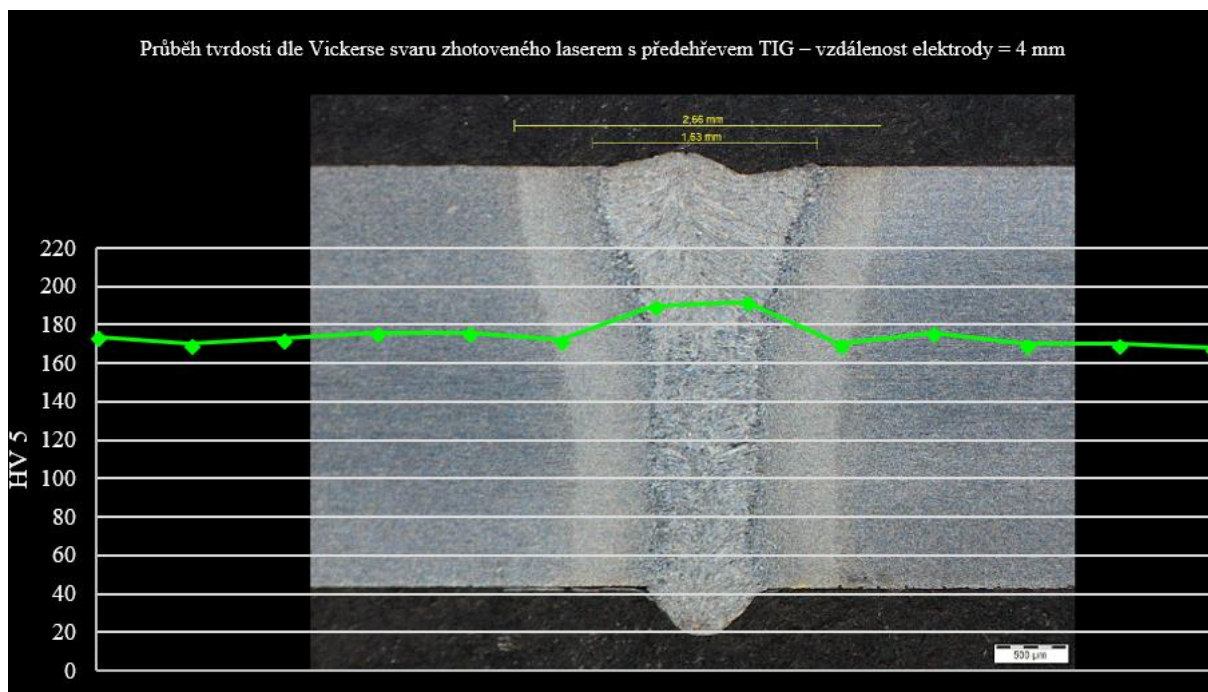
Obr. 70 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 1 mm)



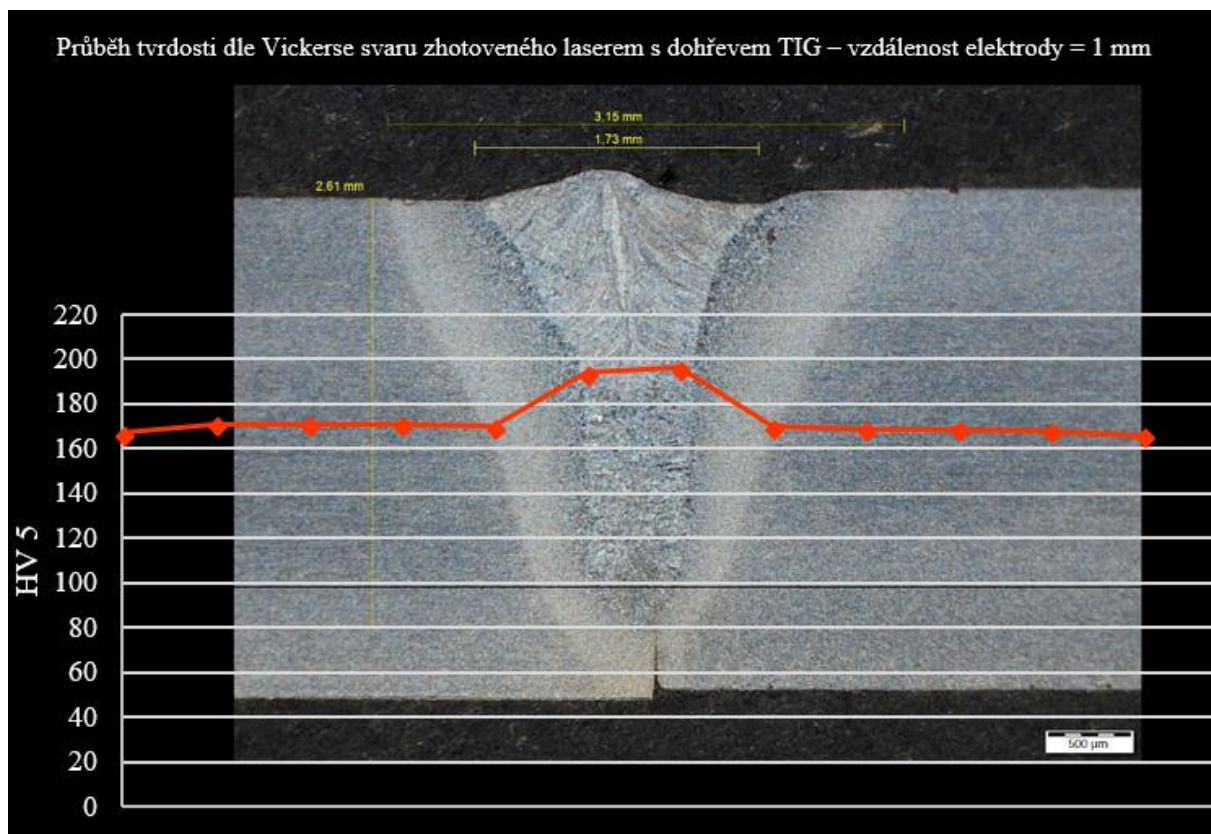
Průběh tvrdosti dle Vickerse svaru zhotoveného laserem s předehřevem TIG – vzdálenost elektrody = 2 mm



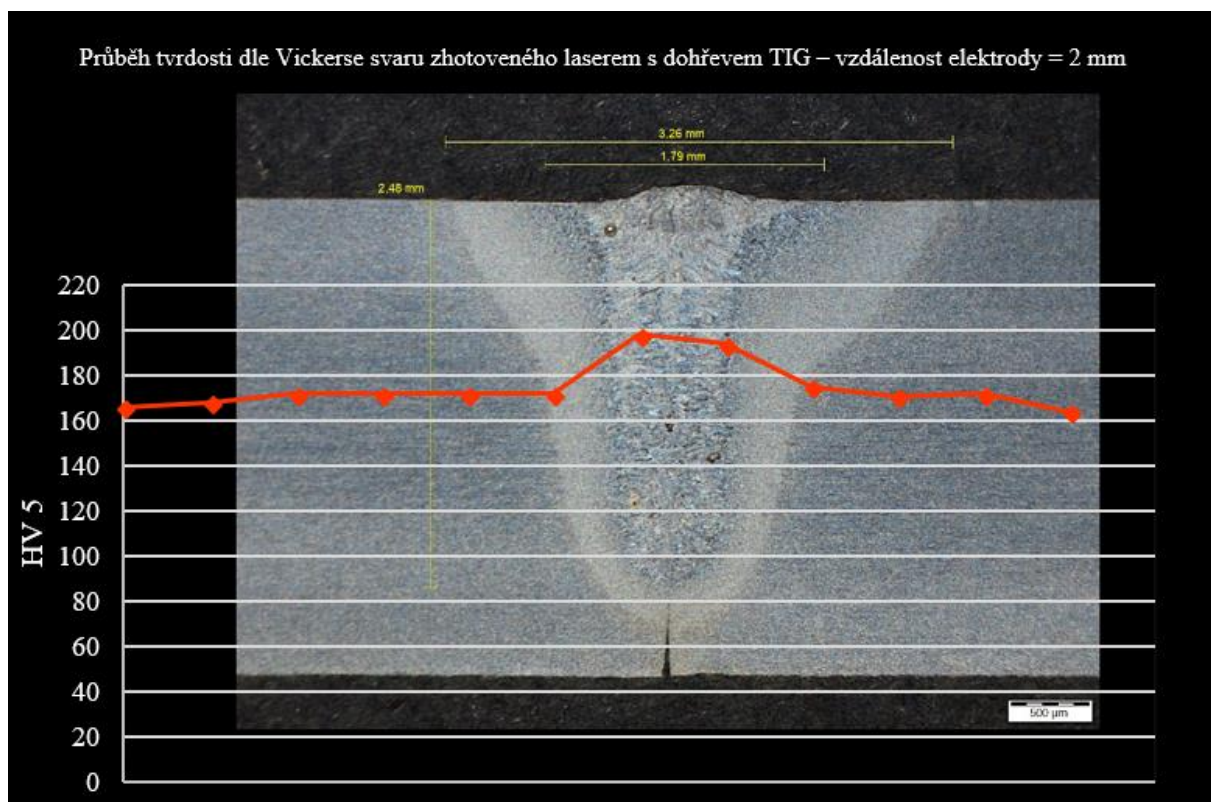
Obr. 71 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 2 mm)



Obr. 72 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 4 mm)

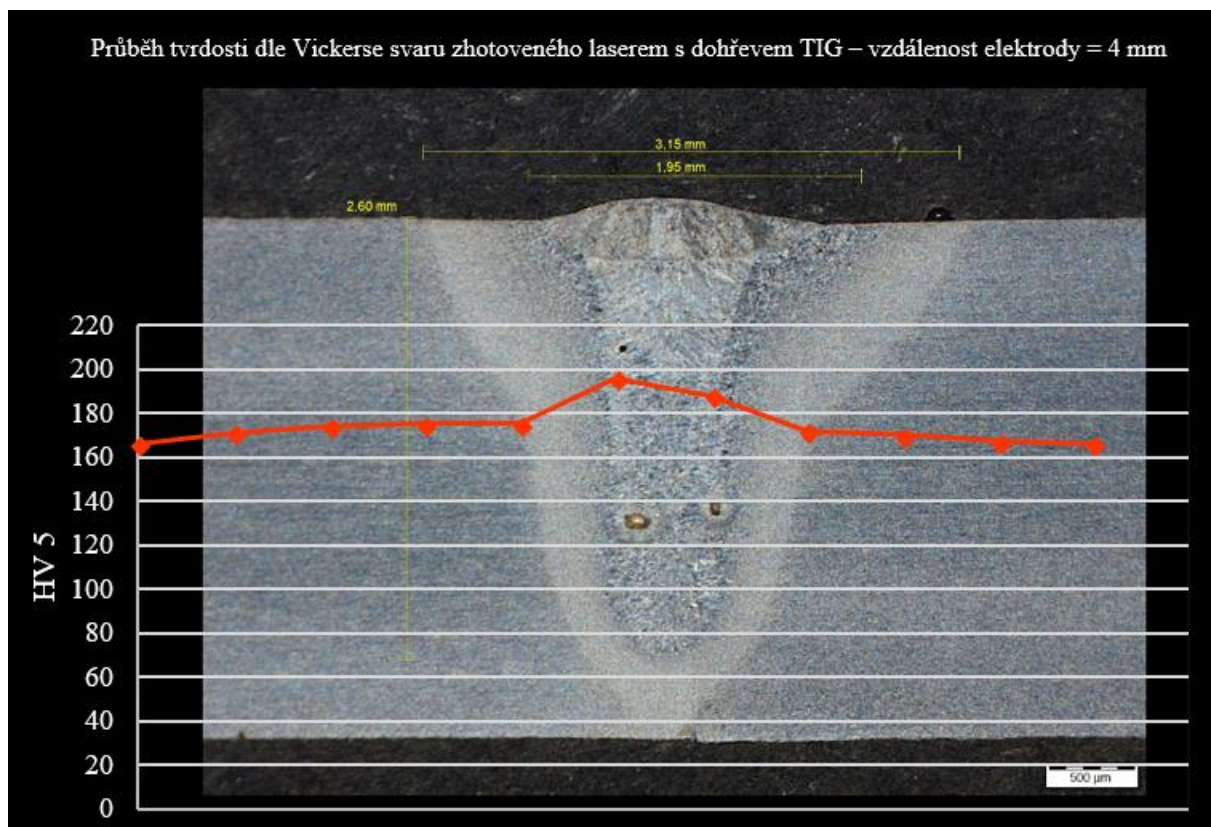


Obr. 73 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 1 mm)



Obr. 74 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 2 mm)





Obr. 75 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
(- vzdálenost elektrody od svazku 4 mm)

## 4 TECHNICKO-EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

S ohledem na skutečnost, že se tato diplomová práce zabývá prvotními experimenty v oblasti využití laserového svařování s obloukovým přehřevem / dohřevem za účelem vytvoření jakostních svarů – a to na obecné rovině, nikoli v rámci řešení nějaké konkrétní součásti, není dost dobře možné zpracovat přesnější technicko-ekonomické zhodnocení. Nicméně je možné přibližně stanovit pořizovací náklady a výlohy spojené s provozem této hybridní technologie:

Tab. 5 Ekonomické zhodnocení hybridní technologie Laser-TIG

Ekonomické zhodnocení hybridní technologie Laser-TIG		
Počet pracovních týdnů v jednom roce		50
Počet pracovních dní v jednom týdnu		5
Počet směn v jednom pracovním dni		2
Počet hodin připadajících na jednu směnu		8
Počet pracovních hodin / rok		4000
Doba odpisů = 5 let		Náklady na 1 hodinu provozu
Laserová stanice (např. pevnolátkový YLS 2000)	10 000 000 Kč	500 Kč
Elektrická energie	2,50 Kč/kWh (příkon 8 kW)	20 Kč
Ochranný plyn (argon)	1700 Kč/lahev/1 měsíc	5,10 Kč
Náhradní díly a servis laserové stanice	150 000 Kč/rok	37,50 Kč
Mzda operátora	200 Kč/hod + 32 % odvody	264 Kč
Celkový součet nákladů na hodinový provoz laserové stanice:		826,60 Kč
Invertor TIG (např. Fronius MagicWave 1700)	95 000 Kč	4,75 Kč
Elektrická energie	2,50 Kč/kWh (příkon 3,5 kW)	8,75 Kč
Ochranný plyn (argon)	1700 Kč/lahev/1 měsíc	5,10 Kč
Náklady na provoz (elektrody, keramické prvky hořáku)		0,25 Kč
Celkový součet nákladů na hodinový provoz invertoru TIG:		18,85 Kč
Celkový součet nákladů na hodinový provoz laserové stanice s invertorem TIG		845,45 Kč
Celková hodinová sazba včetně zohlednění režii 200 %	(tj. 845,45 Kč x 2)	1 690,90 Kč
Celková hodinová sazba včetně předpokládaného zisku 10 %	(tj. 1690,90 Kč x 1,1)	1 860 Kč

Z tabulky 5 vyplývá, že výdaje spojené s přídatným invertorovým zdrojem pro laserové svařování jsou ve srovnání s pořizovací cenou laserové stanice a náklady spjatými s její údržbou téměř zanedbatelné. V rámci celkové hodinové sazby na provoz celého zařízení (1 860 Kč) se tato položka projeví pouze 1 %. Možnou alternativou k obloukovému přehřevu by mohla být laserová stanice s hlavou schopnou rozostřovat výstupní laserový paprsek – to samo o sobě by však zvýšilo pořizovací náklady cca na 150 % ve srovnání se standardním pevnolátkovým laserem. Hybridní technologie spočívající v kombinaci laseru a obloukové metody TIG je tedy obecně cestou, jak dosáhnout vysokých svařovacích rychlostí v rámci svařovacího procesu a minimální zmetkovitosti – a s tím spojené úspory na materiálu i práci zaměstnanců. Je-li totiž potenciálu této technologie náležitě využíváno – tj. jsou-li voleny optimální parametry svařování, lze dosahovat vysoce jakostních svarů, vykazujících velmi dobré mechanické vlastnosti, jež budou pro uživatele zárukou kvality.



## ZÁVĚRY

Tato práce zkoumala vliv použití předehřevu / dohřevu obloukovou metodou TIG v procesu laserového svařování jemnozrnné pevnostní oceli Domex 700 MC. Její výrobce (společnost SSAB) doporučuje v rámci svařování tohoto materiálu obloukovými metodami za standardních podmínek předehřev až při tloušťkách 30 mm a vyšších. Toto však není závazné pro svařování laserem, kde vlivem jeho velké plošné hustoty výkonu dochází k rychlému vývinu tepla na velmi malé oblasti a tím pádem – díky vysokému teplotnímu gradientu – i k velmi rychlému ochlazování. Toto rychlé ochlazování s sebou přináší riziko vzniku zakalených struktur, což se negativně odráží na mechanických vlastnostech zhotovených svařenců.

Z tohoto důvodu byl proveden experiment, při němž byly plechy tloušťky 3 mm zmíněné oceli Domex 700 MC svařeny nejprve samotným laserem, poté laserem s obloukovým předehřevem a v posledku laserem s obloukovým dohřevem. Proměnným parametrem v rámci používání předehřevu či dohřevu pak byla vzdálenost wolframové elektrody TIG od laserového paprsku ( $D_{LA} = 1 \text{ mm}, 2 \text{ mm a } 4 \text{ mm}$ ). Z takto svařených plechů byla zhotovena zkušební tělesa, jež byla následně podrobena zkoušce tahem. Z ní vyplynulo, že u vzorků svařovaných s předehřevem docházelo ve všech zkoušených případech k tvárnému lomu v základním materiálu. Naproti tomu všechna zkušební tělesa zhotovená laserovým svařováním s dohřevem se porušila ve svaru (přesněji řečeno v tepelně ovlivněné oblasti). U vzorků svařovaných čistě laserem došlo k jejich porušení ve dvou případech ze tří rovněž v místě svaru. Nicméně přestože se způsoby přetržení napříč všemi zkušebními vzorky navzájem lišily, pevnost těchto vzorků se nijak zvlášť nelišila (téměř u všech dosáhla mez pevnosti  $R_m$  minimálně 700 MPa).

Za účelem bližšího zkoumání byla posuzována makrostruktura a mikrostruktura svaru. Ze snímků makrostruktury bylo zřejmé, použití předehřevu výraznou měrou napomáhá provaření kořene svaru (- což bylo nejznatelnější při odstupech  $D_{LA} = 2 \text{ mm a } 4 \text{ mm}$ ), oproti tomu u svařenců zhotovených s dohřevem (podobně jako v případě svařenců svařených čistě laserem) k provaření kořene svaru nedošlo; došlo pouze k rozšíření oblasti svarového kovu a tepelně ovlivněné oblasti v místě líce svaru. Mikrostrukturní snímky poukázaly v případě vzorku s předehřevem na plynulejší přechod svarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti z hlediska velikosti zrn, než tomu bylo u svarů zhotovených čistě laserem. To je pravděpodobně způsobeno pozvolnějším ochlazováním svaru díky vnesenému teplu během předehřevu.

Při měření tvrdosti dle Vickerse byly u všech vzorků naměřeny největší tvrdosti v místě svarového kovu, popř. v přechodu svarového kovu do tepelně ovlivněné oblasti. Oproti svarům svařovaným čistě laserem (tj. bez předehřevu a dohřevu) dosahovaly tyto v případě svarů s předehřevem i svarů s dohřevem nižších hodnot (cca o 5 až 10 HV) – lze tedy předpokládat, že struktury svarových kovů nejsou u těchto vlivem ochlazování tolik zakaleny jako v případě svarů zhotovených bez vnesení přídavného tepla.

Vnášení přídavného tepla prostřednictvím předehřevu obloukovou metodou TIG tedy má v procesu laserového svařování svůj opodstatněný význam. Nicméně na přesnější data podložená dlouholetými zkušenostmi si ještě budeme muset počkat. V každém případě pouze na základě těchto zkušeností bude možné potenciálu hybridní technologie, založené na kombinaci laseru a obloukové metody TIG, náležitě využívat a dosahovat tak prostřednictvím optimálně volených parametrů vysoce jakostních svarů, vykazujících velmi dobré mechanické vlastnosti, jež budou pro uživatele zárukou kvality.

## POUŽITÉ ZDROJE:

1. AMBROŽ, Oldřich, Bohumil KANDUS a Jaroslav KUBÍČEK. *Technologie svařování a zařízení: učební texty pro kurzy svářečských inženýrů a technologů*. Ostrava: ZEROSS, 2001, 394 s. Svařování. ISBN 80-857-7181-0.
2. BALEJ, Zdeněk, Vladimír KUDĚLKA a Jan OPLETAL. *Učebnice pro základní kurz svařování ZK 141 8: obloukové svařování wolframovou elektrodou v inertním plynu vysokolegovaných austenitických ocelí : (TIG, WIG, GTAW)*. 3. aktualizované vydání. Ostrava: ZEROSS - svářečské nakladatelství, 2013, 106 s. Svařování. ISBN 978-80-85771-03-9.
3. BARTÁK, Jiří, Václav PILOUS a Rudolf KOVAŘÍK. *Učební texty pro evropské svářečské specialisty, praktiky a inspektory*. Ostrava: ZEROSS, 2002. Svařování. ISBN 80-857-7197-7.
4. BENKO, Bernard, Peter FOREDEK, Miroslav KOSEČEK a Róbert BIELAK. *Laserové technologie*. Bratislava: Vydavateľstvo Slovenskej technickej univerzity, 2000, 118 s. Edícia monografií. ISBN 80-227-1425-9.
5. FOREJT, Milan. *Základy průmyslové technologie: studijní opora*. Brno: Sting, 2008, 123 s. ISBN 978-80-86342-75-7.
6. CHMELÍČKOVÁ, Hana. *Inovace v oboru laserových technologií a jejich aplikací*. Olomouc: Univerzita Palackého v Olomouci, 2012, 22 s. ISBN 978-80-244-3076-8.
7. KESSE, Martin Appiah. *Laser-TIG hybrid welding proces*. 2013. Thesis for the Degree of Master of Science in Technology. Lappeenranta University of Technology. Vedoucí práce Prof. Jukka Martikainen & Dr. (Tech) Paul Kah.
8. KOSINKA, Jakub. *Bodové odporové svařování*. Brno, 2016. Bakalářská práce. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Ladislav Daněk, CSc.
9. KRÍŽ, Daniel. *Studium vlivu velikosti svazku na hloubku prokalení materiálu 42CrMo4 při laserovém kalení*. Brno, 2015, 57 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, Obor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
10. KUNCIPÁL, Josef. *Teorie a technologie svařování, svařovací stroje a zařízení*. Plzeň: Vysoká škola strojní a elektrotechnická, 1980, 263 s.
11. KUNCIPÁL, Josef, Václav PILOUS a Jiří DUNOVSKÝ. *Nové technologie ve svařování*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1984, 291 s.
12. LAPŠANSKÁ, Hana. *Laserové technologie v praxi*. Olomouc: Moravská vysoká škola Olomouc, 2010. ISBN 978-80-87-240-65-6.
13. MACH, Martin. *Využití předeřevu elektrickým obloukem při laserovém svařování ocelí s vyšším obsahem uhlíku*. Brno, 2017, 65 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie svařování a povrchových úprav. Vedoucí práce Doc. RNDr. Libor Mrňa, Ph.D.
14. MALINA, Zdeněk a Miroslav NĚMA. *Učebnice pro základní kurz svařování hliníku a jeho slitin wolframovou elektrodou v inertním plynu (WIG, TIG): ZK 141 W 21*. Ostrava: ZEROSS-svářečské nakladatelství, 2004, 93 s. Svařování. ISBN 80-866-9802-5.
15. MINAŘÍK, Václav. *Přehled metod svařování*. 3., aktualiz. vyd. Ostrava: ZEROSS, 2011, 82 s. Svařování. ISBN 80-866-9818-1.

16. MOLLIKOVÁ, Eva. *Studijní opora předmětu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu: Zkouška tvrdosti podle Vickerse*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2002.
17. MOLLIKOVÁ, Eva. *Studijní opora předmětu vyučovaného v kombinovaném bakalářském studiu: Zkouška tahem*. Brno: Fakulta strojního inženýrství VUT, 2002.
18. MUNCHERYAN, Hrand M. *Laser Technology*. Second Edition. Indianapolis: Howard W. Sams & Co., Inc., 1979. ISBN 0-672-21588-8.
19. PILOUS, Václav. *Technologie kovových materiálů*. 2. vyd. V Plzni: Západočeská univerzita, 2008, 125 s. ISBN 978-80-7043-699-8.
20. RAMBOUSEK, Zdeněk. *Laserové stanice: zdroje, technologie, konstrukce*. Liberec: VÚTS, 2015. ISBN 978-80-87184-61-5.
21. SIGMUND, Marian. *Makro a mikrostruktura svarového spoje: Struktura a vlastnosti svarového kovu spoje*. Brno, 2017.
22. SIGMUND, Marian. *Struktura a vlastnosti tepelně ovlivněné oblasti*. Brno, 2017.
23. SIGMUND, Marian. *Svařitelnost mikrolegovaných, nízko a vysoko legovaných ocelí*. Brno, 2017.
24. SIGMUND, Marian. *Svařitelnost kovových materiálů: Svařitelnost C a C-Mn ocelí*. Brno, 2017.
25. ŠVORC, Jiří. *Vliv geometrie elektrody u TIG svařování*. Praha, 2017. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Karel Kovanda, Ph.D., IWE.
26. TURŇA, Milan. *Špeciálne metódy zvarovania*. Bratislava: ALFA - vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry, 1989, 384 s. ISBN 80-05-00097-9.
27. VRBOVÁ, Miroslava, Helena JELÍNKOVÁ a Petr GAVRILOV. *Úvod do laserové techniky*. Dot. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické, 1998, 233 s. ISBN 80-010-1108-9.
28. *Hutnické aktuality: Laserové technologie opracování kovových materiálů*. Dobrá u Frýdku-Místku: Výzkumný ústav hutnictví železa, 1988, **29**(1), 36 s.. ISSN 0322-8525.
29. *MagicWave 1700 / 2200 TransTig Svařování WIG a obalenou elektrodou* [online]. In: . [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/3933468-Magicwave-1700-2200-transtig-2200-svafiovani-wig-a-obalenou-elektrodou.html>
30. *Metrologie ve strojírenství: Kontrola svarů* [online]. In: . Uherské Hradiště, 2010 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://www.uh.cz/szegsm/files/sblizovani/pdf/kontrola-svaru.pdf>. Projekt: Sbližování teorie s praxí. Střední odborná škola technická Uherské Hradiště.
31. DHI-15 inverter inductie verwarmtoestel. In: *Uw lasspecialist* [online]. 2018 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <https://weldingcompany.be/apparatuur/dhi-15-inverter-inductie-verwarmtoestel>
32. DOSTAWA URZĄDZEŃ SZKOLENIA. In: *KOMPLEKSOWE USŁUGI OBRÓBKİ CIEPŁEJ METALI* [online]. Bytom [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://arc-heat.pl/dostawa-urzedzen>
33. Cutting & Heating with Alternative Fuels. In: *ESAB* [online]. 2015 [cit. 2018-05-23]. Dostupné z: <http://training.victortechnologies.com/blog/cutting-heating-alternative-fuels>
34. TIG svařování I - základní principy.: 07. 01. 2009. In: *SWARWEB: PORTÁL VAŠEHO SVAŘOVÁNÍ* [online]. 2018 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <https://www.svarbazar.cz/phprs/view.php?cislocianku=2008011702>
35. *Svařování metodou TIG* [online]. In: . Ostrava, 2009 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://fs1.vsb.cz/~hla80/2009Svarovani/091.jpg>

36. Svařování metodou MIG/MAG. *J.M.KAPA - špičkové výrobky z plechu: česká soukromá firma založená v roce 1994* [online]. Kolín, 2014 [cit. 2018-05-22]. Dostupné z: <http://www.jmkapa.cz/vyroba/svarovani/>
37. *Laser welding*. New York: A. Wiley-Interscience publication, 1999. ISBN 04-712-4679-4.
38. *Principles of laser materials processing*. Hoboken, N.J.: John Wiley&Sons, Inc. Publication, 2009. Wiley series on processing of engineering materials. ISBN 978-0-470-17798-3.
39. ČSN EN 1011-2 (052210) A. *Svařování - Doporučení pro svařování kovových materiálů: Část 2, Obloukové svařování feritických ocelí = Welding - Recommendations for welding of metallic materials. Part 2*. Praha: Český normalizační institut, 2002, 56 s.
40. Welding of Domex: advanced high strength steels. *SSAB* [online]. Borlänge, 2013 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [https://ssabwebsitescdn.azureedge.net/-/media/files/en/domex/299-welding-of-domex-advanced-high-strength-steels\\_en.pdf?m=20160225150433](https://ssabwebsitescdn.azureedge.net/-/media/files/en/domex/299-welding-of-domex-advanced-high-strength-steels_en.pdf?m=20160225150433)
41. WELDING OF STRENGTH. *SSAB* [online]. Stockholm, 2017 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx/products/strenx-700-mc?accordion=downloads>
42. Domex 700 MC: Hot rolled, extra high strength, cold forming steel. *High strength plates and profiles* [online]. Borlänge, Sweden, 2018, 08. 03. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [http://www.highstrengthplates.com/images/pdfs/Domex\\_700\\_MC.pdf](http://www.highstrengthplates.com/images/pdfs/Domex_700_MC.pdf)
43. The beauty of Strenx: stronger and lighter. *SSAB* [online]. Stockholm, 2016 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.ssab.com/products/brands/strenx/products/strenx-700-mc?accordion=downloads>
44. *VARIGON N2: Prodloužení životnosti zvýšením odolnosti oceli proti korozi* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/shielding\\_gases/varigon\\_n2.html](http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/shielding_gases/varigon_n2.html)
45. VARIGON H2: Zvyšuje rychlost svařování a díky obsahu vodíku má široké možnosti využití. *Technické plyny: Česká republika* [online]. 2018 [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: [http://www.linde-gas.cz/cs/produkty\\_and\\_zasobovani/shielding\\_gases/varigon\\_h2.html](http://www.linde-gas.cz/cs/produkty_and_zasobovani/shielding_gases/varigon_h2.html)
46. Výběr ochranného plynu: Optimální ochranný plyn dle metody svařování. *Schinkmann* [online]. [cit. 2018-05-05]. Dostupné z: <https://www.schinkmann.cz/vyber-ochranneho-plynu>
47. Technology. *AWL* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://awl.nl/cz/technologie>
48. Co je laser a jak funguje?: Charakteristika laserového záření. In: *Fotona* [online]. [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.fotona.cz/cs/technologie/co-je-laser-a-jak-funguje/>
49. Co rozhoduje při volbě typu laseru. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2011, 07.09.2011 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/co-rozhoduje-pri-volbe-typu-laseru.html>
50. Hlavní typy laserů používaných v průmyslu. In: *Megaflex* [online]. 2011, 28.2.2013 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <http://www.mega-blog.cz/lasery/hlavni-typy-laseru-pouzivanych-v-prumyslu/>
51. Lasery, laserové technologie a stroje s laserem. In: *MM Průmyslové spektrum* [online]. Praha: MM publishing, 2006, 17.07.2006 [cit. 2018-04-29]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/lasery-laserove-technologie-a-stroje-s-laserem.html>
52. *Průmyslové aplikace laserů*. Pardubice: Dům techniky ČSVTS, 1986, 66 s.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK:

Označení	Legenda	Jednotka
A	tažnost	[%]
b <sub>0</sub>	šířka zkoušené délky tyče	[mm]
CE	uhlíkový ekvivalent	[hm. %]
CET	uhlíkový ekvivalent dle CET	[hm. %]
D <sub>LA</sub>	distance (laser-arc) = vzd. elektrody o laseru	[mm]
F	zatěžující síla	[N]
F <sub>m</sub>	maximální zatížení (síla na mezi pevnosti)	[N]
HD	objem difúzního vodíku	[ml.100 g <sup>-1</sup> ]
I	svařovací proud	[A]
k	koeficient účinnosti postupu svařování	[-]
KV	nárazová práce při zkoušce rázem v ohybu	[J]
L <sub>0</sub>	počáteční měřená délka tyče	[mm]
L <sub>u</sub>	konečná měřená délka tyče	[mm]
LASER	light amplification by stimulated emission of radiation	[-]
MAG	metal active gas	[-]
MIG	metal inert gas	[-]
P	svařovací výkon	[kW]
Q <sub>s</sub>	vnesené teplo	[kJ·mm <sup>-1</sup> ]
R <sub>e</sub>	mez kluzu	[MPa]
R <sub>m</sub>	mez pevnosti	[MPa]
R <sub>p0,2</sub>	smluvní mez kluzu	[MPa]
SK	svarový kov	[-]
S <sub>0</sub>	počáteční průřez tyče	[mm <sup>2</sup> ]
S <sub>u</sub>	konečný průřez tyče	[mm <sup>2</sup> ]
tl.	tloušťka (plechu)	[mm]
TIG	tungsten inert gas	[-]
TOO	tepelně ovlivněná oblast	[-]
T <sub>p</sub>	teplota předehřevu	[°C]
t	tloušťka svařovaného plechu	[mm]
U	svařovací napětí	[V]
v <sub>s</sub>	svařovací rychlost	[mm.s <sup>-1</sup> ]
WIG	Wolfram Inert Gas	[-]
YAG	yttrium aluminium granát	[-]
Y <sub>3</sub> Al <sub>5</sub> O <sub>12</sub>	yttrium aluminium granát	[-]
Z	kontrakce (zúžení)	[%]
ZM	základní materiál	[-]
ε	poměrné prodloužení	[-]
η	tepelná účinnost přenosu tepla	[-]
λ	vlnová délka	[nm]
σ	napětí	[MPa]



## SEZNAM OBRÁZKŮ:

- Obr. 1 Aplikace laserového svařování na poli strojírenského průmyslu
- Obr. 2 Svařování metodou MIG/MAG
- Obr. 3 Svařování metodou TIG
- Obr. 4 Svařování laserovým paprskem Obr. 5 Ohřev plamenem
- Obr. 6 Odporový ohřev
- Obr. 7 Indukční ohřev
- Obr. 8 Hybridní technologie LASER-TIG
- Obr. 9 Princip stimulované emise záření
- Obr. 10 Schématické znázornění principu laserového zařízení
- Obr. 11 Příklad laserové stanice – ÚPT Akademie věd Brno
- Obr. 12 Rozdělení laserů (nejen průmyslových) z hlediska vlnových délek
- Obr. 13 Schématické znázornění SLAB laseru
- Obr. 14 Schéma výbojkami buzeného Nd:YAG laseru
- Obr. 15 Schéma diodami buzeného Nd:YAG laseru
- Obr. 16 Schématické znázornění vláknového Yb:YAG laseru
- Obr. 17 Korekce laserového paprsku emitovaného diodovým laserem
- Obr. 18 Plošná hustota výkonu různých technologií svařování
- Obr. 19 Absorptivita (pohltivost) vybraných materiálů
- Obr. 20 Kondukční a penetrační režim laserového svařování
- Obr. 21 Pulzní a kontinuální režim laserového svařování
- Obr. 22 Tvary průvarů při různém rozložení energie dopadajícího laserového svazku
- Obr. 23 Vliv teplotního účinku svařování na strukturu svarového spoje
- Obr. 24 Stanovení teploty předehřevu
- Obr. 25 Schématický návod pro výpočet kombinované tloušťky
- Obr. 26 ARA diagram pro ocel Strenx 700 (dle dřívějšího označení Domex 700)
- Obr. 27 Svařování metodou TIG
- Obr. 28 Tvar elektrického oblouku TIG v závislosti na vrcholovém úhlu svařovací elektrody
- Obr. 29 Invertorové svařovací zdroje pro metodu TIG
- Obr. 30 Hybridní technologie laser-TIG
- Obr. 31 Hoření elektrického oblouku v rámci technologie laser – TIG v závislosti na vzdálenosti wolframové elektrody od laserového svazku
- Obr. 32 Schématický obrázek svarových vad
- Obr. 33 Tabulka pro stanovení teploty předehřevu od společnosti SSAB
- Obr. 34 Laserová stanice s invertorovým zařízením TIG na ÚPT AV ČR v Brně
- Obr. 35 Upnutí svařovaných plechů do přípravku polohovacího stolu
- Obr. 36 Plechy Domex 700 MC tl. 3 mm po svaření
- Obr. 37 Ploché zkušební vzorek – základní rozměry
- Obr. 38 Upnutí zkušební tělesa do trhacího stroje ZD 40
- Obr. 39 Zkušební tělesa po tahové zkoušce – nahoře vyřezaná ze základního materiálu, dole vyřezaná z plechů svařených laserem ze přídavného tepla (tj. bez předehřevu či dohřevu)
- Obr. 40 Zkušební vzorky po tahové zkoušce zhotovené z plechů svařovaných laserem s obloukovým předehřevem při uvedených vzdálenostech elektrody TIG od laserového svazku (nahore 1 mm, vprostřed 2 mm, dole 4 mm)
- Obr. 41 Zkušební vzorky po tahové zkoušce zhotovené z plechů svařovaných laserem s obloukovým dohřevem při uvedených vzdálenostech elektrody TIG od laserového svazku (nahore 1 mm, vprostřed 2 mm, dole 4 mm)
- Obr. 42 Smluvní tahový diagram (základní materiál Domex 700 MC)
- Obr. 43 Smluvní tahový diagram (laser bez předehřevu/dohřevu)
- Obr. 44 Smluvní tahový diagram (laser s předehřevem –  $D_{LA}=1$  mm)
- Obr. 45 Smluvní tahový diagram (laser s předehřevem –  $D_{LA}=2$  mm)

- Obr. 46 Smluvní tahový diagram (laser s předehřevem –  $D_{LA}=4$  mm)  
 Obr. 47 Smluvní tahový diagram (laser s dohřevem –  $D_{LA}=1$  mm)  
 Obr. 48 Smluvní tahový diagram (laser s dohřevem –  $D_{LA}=2$  mm)  
 Obr. 49 Smluvní tahový diagram (laser s dohřevem –  $D_{LA}=4$  mm)  
 Obr. 50 Laboratorní pila MTH Mikron 110  
 Obr. 51 Zalisování vzorku do plastové hmoty  
 Obr. 52 Metalografická bruska Struers Tegamin-20  
 Obr. 53 Vyleptané metalografické vzorky  
 Obr. 54 Optický mikroskop Olympus SC 50  
 Obr. 55 Svar zhotovený samotným laserovým svazkem (bez předehřevu či dohřevu)  
 Obr. 56 Makrostruktura svaru (laser s předehřevem TIG – vzdálenost elektrody 1 mm)  
 Obr. 57 Makrostruktura svaru (laser s předehřevem TIG – vzdálenost elektrody 2 mm)  
 Obr. 58 Makrostruktura svaru (laser s předehřevem TIG – vzdálenost elektrody 4 mm)  
 Obr. 59 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 1 mm)  
 Obr. 60 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 2 mm)  
 Obr. 61 Makrostruktura svaru (laser s dohřevem TIG – vzdálenost elektrody 4 mm)  
 Obr. 62 Konfokální mikroskop Olympus LEXT 3100  
 Obr. 63 Jemnozrná struktura základního materiálu Domex 700 MC  
 Obr. 64 Mikrostruktura svarového kovu a TOO (laser bez předehřevu/dohřevu)  
 Obr. 65 Přejchod jemnozrné TOO do základního materiálu (laser bez předehřevu/dohřevu)  
 Obr. 66 Mikrostruktura SK a TOO (laser s předehřevem – elektroda 1 mm od laserového svazku)  
 Obr. 67 Detailní makrostruktura svarů zhotovených laserem s dohřevem  
 Obr. 68 Tvrdoměr Zwick 3212  
 Obr. 69 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem zhotoveným samotným laserem  
 Obr. 70 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 1 mm)  
 Obr. 71 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 2 mm)  
 Obr. 72 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s předehřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 4 mm)  
 Obr. 73 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 1 mm)  
 Obr. 74 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 2 mm)  
 Obr. 75 Průběh tvrdosti dle Vickerse napříč svarem – laser s dohřevem TIG  
 (- vzdálenost elektrody od svazku 4 mm)

## SEZNAM TABULEK

- Tab. 1 Souhrnný přehled vlastností pevnolátkových laserů  
 Tab. 2 Určení stupně obsahu difuzního vodíku  
 Tab. 3 Chemické složení oceli Domex 700 MC  
 Tab. 4 Parametry laserového svařování s obloukovým předehřevem metodou TIG  
 Tab. 5 Ekonomické zhodnocení hybridní technologie Laser-TIG

## SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1. S 700 MC – atesty  
 Příloha 2. Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

Priloha 1.

voestalpine  
Steel & Service Center  
GmbH

ein 100% Tochterunternehmen  
der voestalpine Stahl GmbH

A02

Abnahmeprüfzeugnis  
Inspection certificate

3.1 - EN 10204

Seite  
Page

1 von  
of

2

A01

voestalpine  
Stahl GmbH  
voestalpine-Straße 3  
4020 Linz, Austria  
www.voestalpine.com/stahl

A03 Bezeichnung:-Nr.: Document number	W1342078/A	A08 Auftrags-Nr.: Order-No.:	8452729	A07 BestDat.: OrderDat.	21-01-2016	Versanddatum: Date of dispatch	16-03-2016	0F
A06 Besteller Customer	HOT ROLLED SHEETS WARMGEW. TAFELBLECH							
A07 BestNr.: OrderNo.	S700MC							B03 Norm Standard
A06 Empfänger Consignee								
A10 - Ergänzende Angaben - Supplementary information FORM- UND MASSTOLERANZNORM EN10051								

Z01 - Besichtigung und Maßprüfung: keine Beanstandung. Wir bestätigen, dass die oben bezeichnete Lieferung den Bestellvorschriften (Normvorschriften) entspricht.  
Z01 - Kennzeichnung: Erschmelzungsart (wenn spezifiziert), Markenbezeichnung, Schmelznummer, Band/Blechnummer.  
Z01 - Marking: Steelmaking Process (if specified), Grade of Material, Cast-Number, Plate-Number  
Z01 - Visual Examination and dimensional checking: satisfactory. We herewith certify that the above mentioned delivery complies with the purchasing requirements (standard specifications).

Umfang der Lieferung - Detail of supply									
Dimensionen - Dimensions									
B07 Schmelze Heat No.	B06 Blech-Nr Coil No	B09 Pos Dikte Item Thickness	B10 Breite Width	B11 Länge Length	B08 Stück Piece	B12 Brutto Gross	B13 B14 Netto Lief-Nr Net Dup-No		
		mm	mm	mm		kg	kg		
962718	788267	20	3,00	1500,0	88	18.972	18.904	23505	
Summen - Sum						88	18.972	18.904	
C70 - Erschmelzungsverfahren: LD - Method of steelmaking: pure oxygen blown									

Chemische Zusammensetzung (Schmelzanalyse) - Chemical composition (Heat analysis)													
B07 Schmelze Heat No.	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Mo	Cu	V	Nb	Ti
	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
962718	.065	.024	1.880	.008	.0009	.044	.028	.023	.010	.020	.008	.050	.136
													0.0002

A04  
Herstellerzeichen  
Symbol of the manufacturer's work

voestalpine

A01,A05;Z02  
Abnahmebeauftragte(r) des Herstellers  
Inspection representative  
Quality control dptm. hot strip production  
S. Würzenberger  
Tel.:+43/50304/15/77264

voestalpine  
EINEN SCHRITT VORAUS.

**Ergebnisse der Prüfungen - Test results**

Versuch Test	Zugvers. TensileI	Kerbschlagbiegeversuch											
B06	C02	C11	C12	C13	C02	C40	C03	C42	C42	C42	C42	C42	C42
Blech-Nr	Lage L0	Rp0,2	Rm	A	Lage	Pf	Temp	EW	EW	EW	EW	EW	EW
Coil No	Dir L0	YP	TS	E	Dir	shape	Temp	SV	SV	SV	SV	SV	SV
		MPA	MPA	%			GRD	C	J	J	J	J	J
788267	L	A5	772	798	20.4	L	CV	10	x	t	-40	33	34

**Anmerkungen - Remarks**

Bei Rückfragen wenden Sie sich bitte an: Herrn Jürgen Hengstschläger, Telefon 0043 50304 15 6792  
If there are any questions, please contact: Mr. Jürgen Hengstschläger, phone 0043 50304 15 6792

## Příloha 2.

### Hydraulický zkušební stroj ZD40 /400kN/

Stroj umožňuje provádět tahové, tlakové a ohybové zkoušky materiálů do 400 kN s řízením rychlosti zatěžování a programovým zpracováním zkoušek. Je vybaven vestavěným inkrementálním délkovým snímačem polohy příčnicku s rozlišením 0,01 mm a snímačem síly s řídicí jednotkou EDC 60.

Řídicí jednotka EDC 60 je vysoce precizní elektronické zařízení speciálně konstruované pro řízení servo-hydraulických zkušebních strojů. Je vyráběna speciálně pro aplikace řízení zkušebních strojů a využívají ji přední evropští výrobci universálních zkušebních strojů. Jednotka je opatřena programem pro zkoušky kovů s možností provádět zkoušky bez PC u jednoduchých aplikací bez použití průtahoměru.

Technické parametry:

- Výrobce: HBM /SRN/
- Měřicí rozsah: 8 ÷ 400 kN
- Chyba měření síly: 1/100 jmenovitého rozsahu síly, tj.  $\pm 1 \%$  odpovídá třídě přesnosti 1
- Měřicí rozsah měření dráhy: 0 ÷ 280 mm
- Chyba měření dráhy:  $\pm 0,01$  mm
- sériové rozhraní RS 232 pro komunikaci s nadřazeným PC
- COM1 pro PC s FIFO s maximální rychlostí 115 KB
- inkrementální vstup pro napojení snímače dráhy

Počítač je vybaven programem M-TEST v.1.7 pro tahovou, tlakovou a ohybovou zkoušku kovových materiálů dle EN 10001-2 s vyhodnocením výsledků, grafickým zpracováním.



Řídicí jednotka EDC 60